

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

Luiza Marina Esteves de Carvalho

ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE CARVÃO UTILIZANDO UMA
AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)

Diamantina

2020

Luiza Marina Esteves de Carvalho

**ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE CARVÃO UTILIZANDO UMA
AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Eric Bastos Gorgens

Diamantina

2020

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C331e

Carvalho, Luiza Marina Esteves de.

Estimativa do volume de pilhas de carvão utilizando uma aeronave remotamente pilotada (RPA) / Luiza Marina Esteves de Carvalho, 2020.

65 p. : il.

Orientador: Eric Bastos Gorgens.

Dissertação (Mestrado – Pós-Graduação em Ciência Florestal - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020.

1. Eucalipto. 2. Volume. 3. GNSS. 4. RTK. 5. Fotogrametria. 6. Aerolevanteamento. 7. Estereoscopia. I. Gorgens, Eric Bastos. II. Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

CDD 634.9285

Ficha Catalográfica – Sistema de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecária: Jullyele Hubner Costa – CRB6/2972



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

LUIZA MARINA ESTEVES DE CARVALHO

ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE CARVÃO UTILIZANDO UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em **Ciência Florestal** da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, **nível de Mestrado**, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestra em Ciência Florestal**.

Orientador: Prof. **Eric Bastos Gorgens**

Data de aprovação 30/07/2020.

Dr. Glauco José de Matos Umbelino - (UFVJM)

Dr. Emanuel Araújo Silva - (UFRPE)

Dr. Gabriel Paes Marangon - (UNIPAMPA)



Documento assinado eletronicamente por **GABRIEL PAES MARANGON, Usuário Externo**, em 30/07/2020, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Emanuel Araújo Silva, Usuário Externo**, em 30/07/2020, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Glauco José de Matos Umbelino, Servidor**, em 02/08/2020, às 12:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eric Bastos Gorgens, Servidor**, em 28/09/2020, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufvjm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0135676** e o código CRC **96C2C8E9**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que é e sempre foi o grande maestro da minha vida.

Aos meus amados pais, Edilene e Jefferson, fonte de amor e motivação. Obrigada pela oportunidade e apoio. Agradeço ao meu irmão, Matheus, pelo companheirismo e cumplicidade. Amo muito vocês. Esse momento é mais uma etapa que passamos e vencemos juntos!

Agradeço ao Rafael, pelo companheirismo durante essa jornada. Obrigada por me acompanhar durante toda essa etapa.

Agradeço ao meu orientador Eric Gorgens pela orientação, competência, profissionalismo e dedicação. Tantas vezes nos reunimos e você sempre me ajudou, me impulsionando para dar o meu melhor. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável, e pelas oportunidades que me foram ofertadas. Você é um exemplo de profissional, foi inspirador trabalhar com você ao longo desses dois anos. Espero que nossa parceria se mantenha por muito tempo.

Agradeço a Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, e ao Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal. Agradeço à todos os professores, funcionários e alunos do Departamento de Engenharia Florestal.

Agradeço à todos os amigos da pós-graduação em Ciência Florestal, em especial à Aline Carvalho e Alline Zagnolli. Agradeço ao laboratório *treelab* e à todos os membros pelo companheirismo e ensinamentos.

Agradeço as amigas que a universidade me presenteou, em especial à Jhonathan Gomes pela ajuda, incentivo e amizade nesse último ano. Agradeço à Maria Luiza pela ajuda e colaboração.

Agradeço aos meus amigos de Diamantina e Sete Lagoas pelo apoio. Vocês fizeram essa caminhada mais branda.

Agradeço aos membros da banca por aceitarem meu convite e que se dispuseram a ler, avaliar e colaborar com o meu trabalho. Em especial, agradeço ao professor Glauco pelo auxílio no processamento dos dados.

Agradeço à Capes, FAPEMIG e CNPq.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, muito

obrigada!

RESUMO

Um desafio presente nas empresas produtoras de carvão vegetal é a quantificação e controle do volume de carvão em pátio nas unidades de produção. No processo mecanizado, a produção do carvão vegetal é feita em forno retangular de alvenaria, que após a pirólise é aberto e descarregado. As pilhas de carvão permanecem estocadas no pátio resfriando até o momento em que serão carregadas e transportadas para as siderúrgicas. O objetivo desse trabalho é propor uma metodologia para mensuração do volume de pilhas de carvão, a partir da estereoscopia digital utilizando aerofotogrametria e aeronave remotamente pilotada em alternativa ao tradicional estimativa baseada em levantamento GNSS/RTK (tradicional). No mesmo dia foi realizado levantamento com GNSS/RTK e coleta de imagens aéreas com uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA). Foram considerados duas parametrizações no processamento estereoscópico com pontos de controle: acurácia muito baixa no alinhamento das imagens, qualidade muito baixa na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces muito baixa na criação da malha tridimensional (M1); e acurácia alta no alinhamento das imagens, qualidade alta na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces alta na criação da malha tridimensional (M2). A partir do ortomosaico foram estimados o volume das pilhas. Os métodos de estimativa foram comparados pelo teste de hipótese F-Graybill. O RTK e M1 foram estatisticamente iguais, apresentando uma diferença de 6,54%; e os valores de RTK e M2 foram estatisticamente diferentes, apresentando uma diferença de 7,89%. O processamento M1 resultou em valores similares ao processamento tradicional baseado em RTK; ganhos na estimativa volumétrica podem ser auferidos com o processamento M2, porém com maior tempo de processamento. Conclui-se que o processamento RTK pode ser substituído sem perda de informação pelo método de estimativa baseado em RPA.

Palavras-chave: Eucalipto. Volume. GNSS. RTK. Fotogrametria. Aerolevantamento.

Estereoscopia.

ABSTRACT

A current challenge in the charcoal producers is the quantification and control of the charcoal volume stored in the production units. When mechanized, the charcoal is produced in rectangular masonry ovens, which after the pyrolysis process, is opened and unloaded. The coal piles remain stored in the yard cooling until ready to be transported to the steel mills. The objective of this work is to propose a methodology for measuring the volume of coal piles, based on digital stereoscopy and remote piloted aircraft as an alternative to the traditional estimation based on GNSS/RTK survey. On the same day the survey with GNSS / RTK and image collection using a Remote Piloted Aircraft (RPA) were carried out. The data was processed considering two set of parameters: very low accuracy in the alignment of the images, very low quality in the creation of the dense cloud, very low quality and face count in the creation of the three-dimensional mesh (M1); and high accuracy in the alignment of the images, high quality in the creation of the dense cloud, high quality and count of the faces in the creation of the three-dimensional mesh (M2). In both processes, seven control points were used. From orthomosaic the piles volume were determined. The methods were compared using the F-Graybill hypothesis test. The RTK and M1 were statistically equal, with a difference of 6.54%; and the RTK and M2 are statistically different, with a difference of 7.89%. The M1 processing resulted in similar volumes if compared to the traditional RTK processing; improvements in the volume estimation is observed using M2 processing, however with a trade-off related to time consuming. As a conclusion, RTK could be replaced without compromising information by estimation based on RPA.

Keywords: Eucalyptus. Volume. GNSS. RTK. Photogrammetry. Airborne survey. Stereoscopy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sobreposição lateral e longitudinal.....	26
Figura 2 – Planos de voos mais utilizados.....	29
Figura 3 – Esquema evidenciando um mesmo objeto em imagens distintas, possibilitando a reconstituição tridimensional.....	31
Figura 4 – ilustração da captura de imagem evidenciando a rotação para cada eixo ortogonal da RPA com o CP da imagem.....	32
Figura 5 – Esquema representando a seleção dos pontos-chave, geração das nuvens esparsa e densa.....	35
Figura 6 – Fluxograma apresentando o desenvolvimento do trabalho nas etapas de gabinete e campo.....	40
Figura 7 – Identificação das pilhas e pontos de controle utilizados.....	41
Figura 8 – UPC localizada no município de Vazante, em Minas Gerais.....	42
Figura 9 – esquema exemplificando o grid duplo realizado na área, em que: (i) setas vermelhas representam voo no sentido lateral, seguido pelas (ii) setas amarelas representando voo no sentido longitudinal.....	43
Figura 10 – Coleta dos pontos na UPC utilizando GNSS/RTK.....	45
Figura 11 – Visualização dos pontos coletados em campo pelo RTK das pilhas de carvão 1 e 2, respectivamente.....	46
Figura 12 – Alinhamento das imagens, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.....	48
Figura 13 –Nuvem densa, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.....	49
Figura 14 – Reconstrução tridimensional, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.....	50
Figura 15 – MDE em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.....	51

Figura 16 – Ortomosaico, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.....	52
Gráfico 1 – Box-plot para os processamentos M1, M2 e RTK.....	55
Gráfico 2 – Gráficos de dispersão para os processamentos M1 e M2, quando comparados ao RTK.....	56
Mapa 1 – Esquema que representa mapa de localização da área referente ao estudo.....	41
Quadro 1 – Regulamentação segundo a ANAC.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parametrização de cada etapa do processamento.....	44
Tabela 2 – Tempo de cada etapa do processamento, considerando as duas qualidades do processamento.....	47
Tabela 3 – Volume das pilhas de carvão obtidos pelos processamentos M1, RTK e M2 em m ³	53
Tabela 4 – Diferença em m ³ e percentual dos processamentos M1 e M2, quando comparados ao RTK.....	54
Tabela 5 – Análise estatística.....	54
Tabela 6 – Número de pontos na nuvem densa, números de triângulos na malha tridimensional, resolução do MDE e ortomosaico (cm/pix) para os processamentos M1 e M2.....	55

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

BVLOS – Operação além da linha de visada

CPs – Centros de Perspectivas

EVLOS – Operação linha de visada visual estendida

GNSS – Sistema Global de Navegação por Satélite

GPS – Global Positioning System

GSD – Distância de amostra do solo

MDE – Modelo Digital de Elevação

M1 – acurácia muito baixa no alinhamento das imagens, qualidade muito baixa na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces muito baixa na criação da malha tridimensional

M2 – acurácia alta no alinhamento das imagens, qualidade alta na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces alta na criação da malha tridimensional

PC – Ponto de Controle

RG – Rendimento Gravimétrico

RPA – Aeronave Remotamente Pilotada

RTK – Posicionamento Cinemático em Tempo Real

TIN – Rede de Triangulação Irregular

UPC – Unidade de Produção de Carvão

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

VLOS – Operação em Linha de Visada Visual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO	19
3 REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1 Carvão vegetal	21
3.2 GNSS/RTK	23
3.3 Aeronave Remotamente Pilotada	24
3.4 Fotogrametria	30
3.5 Produtos de um aerolevantamento	32
3.6 Estudo da parametrização para o processamento	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS	39
5 RESULTADOS	47
6 DISCUSSÃO	57
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 INTRODUÇÃO

Antes dos modernos vetores de energia, como combustíveis fósseis e eletricidade, o carvão vegetal era o combustível do mercado em termos de valor de aquecimento, disponibilidade, armazenamento e transporte (KREBS *et al.*, 2017). O carvão vegetal é um combustível doméstico popular em muitas partes do mundo em desenvolvimento (ADAM, 2009), além de ser usado como redutores nos processos metalúrgicos desde os tempos antigos, tal como a fabricação de ferro-gusa (NORGATE; LANGBERG, 2009).

O carvão vegetal tem como matéria prima as espécies madeireiras, resíduos agroindustriais e outras formas de biomassa, que são carbonizadas sob condições controladas em um espaço confinado, como fornos de alvenaria. A produção do carvão difere amplamente entre os países e pode se basear em uma extensa variedade de técnicas (SEBOKA, 2009). Espera-se que a demanda por carvão continue crescente nas próximas décadas (OKODE *et al.*, 2020).

A produção de carvão consiste na transformação da biomassa através do processo de pirólise. O processo ocorre em quatro estágios principais conduzidos pela temperatura exigida em cada estágio (SEBOKA, 2009). Quando a produção de carvão é de forma mecanizada, após o processo de pirólise o carvão é puxado de dentro dos fornos de alvenaria em direção ao exterior (pátio) para o processo de resfriamento. Ele permanece estocado no pátio até o transporte. O material é coberto, normalmente com lonas, para evitar o contato com a água da chuva (DUPIN *et al.*, 2019; OLIVEIRA, 2009).

Geralmente o controle da produção é feito com base no volume de carvão estocado no pátio. O procedimento mais utilizado para a estimativa de carvão em pátio é o método de levantamento topográfico. Esse método consiste na coleta de pontos no terreno e sobre as pilhas de carvão, determinando as coordenadas de latitude, longitude e altitude dos pontos coletados (OLIVEIRA, 2015). Um dos equipamento utilizados para este é o GNSS (Sistema Global de Navegação por satélite) / RTK (Posicionamento Cinemático em Tempo Real). Esse sistema possibilita a diminuição do tempo de monitoramento para obtenção de ponto fixo (BUSNELLO; TECCHIO; ISOTON, 2016). A distância limite entre a base (estação de referência) e o *rover* (usuário) é de cerca de 20 km. Outro fator limitante é a transmissão das ondas de rádio (base e *rover*). Na presença de obstáculos, a precisão dos dados não será alcançada devido a barreiras físicas (SILVA, 2014). Geralmente, as

empresas produtoras de carvão, realizam de um a dois levantamentos de estoque em pátio por ano. Uma das razões é que o serviço é geralmente prestado por empresas terceirizadas, e exigem mobilização para visitas às unidades de produção de carvão espalhadas em diferentes regiões. A baixa frequência do levantamento do estoque geralmente reflete em estoques defasados e pouco confiáveis nas bases de dados das empresas.

Atualmente, uma forma inovadora de estimativa de volume é a estereoscopia digital utilizando a aerofotogrametria embarcada em uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA). Anifantis *et al.* (2019) utilizaram fotogrametria de curto alcance da RPA para estimar o volume de linhas de árvores em um pomar de oliveiras, obtendo bons resultados. Mokros *et al.* (2016) desenvolveram um estudo para estimar volume de pilhas de aparas de madeiras, concluindo que o uso de RPA leva a resultados mais detalhados, além do tempo para coleta de dados ser significativamente menor. Figueiredo *et al.* (2016) realizaram um estudo a fim de estimar o volume de madeira em pátios de estocagem de toras, obtendo bons resultados com a RPA. Raeva, Filipova e Filipov (2016) estimaram o volume de estoque de uma pedreira, alcançando um baixo erro de medição. Rahman *et al.* (2017) utilizaram imagens de um RPA para cálculo do volume de água de um tanque, alcançando resultado satisfatório. As RPA's possuem uma boa qualidade posicional, altas resoluções espaciais e temporais, boa relação qualidade/custo por hectare, além da possibilidade dos levantamentos com alta resolução temporal (frequência de levantamento) (AVILA, 2019).

Na área florestal, além da estimativa de volumes, a fotogrametria obtida por RPA's tem várias aplicações, tais como: previsão do estoque de madeira da floresta (GIANNETTI *et al.*, 2018), modelagem da densidade das árvores e a altura do dossel em povoamentos de florestas boreais jovens (PULITI; SOLBERG; GRANHUS, 2019), estimação de propriedades biofísicas da floresta (OTA *et al.*, 2017), medições da altura das árvores (KRAUSE *et al.*, 2019) e reconstrução detalhada da superfície tridimensional do dossel de florestas mistas de coníferas e folhosas (JAYATHUNGA; OWARI; TSUYUKI, 2018). Dessa forma, verifica-se a ampla aplicabilidade das RPA's no setor florestal, bem como a possibilidade de estimativa volumétrica aliado a estereoscopia digital utilizando a aerofotogrametria embarcada.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para mensuração do volume de pilhas de carvão, a partir da estereoscopia digital utilizando a aerofotogrametria embarcada em RPA.

Os objetivos específicos são: (i) Comparar a estimativa volumétrica de pilhas de carvão baseada na utilização de pontos de campo GNSS / RTK e estereoscopia digital; (ii) Comparar o processamento utilizando a acurácia muito baixa no alinhamento das imagens, qualidade muito baixa na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces muito baixa na criação da malha tridimensional (M1), com a acurácia alta no alinhamento das imagens, qualidade alta na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces alta na criação da malha tridimensional (M2).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Carvão vegetal

O carvão vegetal é proveniente da queima parcial e controlada da madeira. Mesmo nos países em que há o acesso a outras fontes energéticas, o carvão vegetal tem utilidade tecnológica importante. No Brasil, a produção de alguns fundidos utiliza o carvão vegetal devido à isenção de enxofre, um elemento químico que está presente no carvão mineral (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

Minas Gerais é o estado com maior produção nacional de carvão vegetal oriundo da silvicultura, abrigando o maior percentual das indústrias consumidoras desse produto (SANTOS, 2017). Quando de forma mecanizada, a produção do carvão vegetal é feita em fornos retangulares de alvenaria, com capacidades de processamento de madeira que variam entre 150 a 450 m³ de volume sólido (ou 80 a 250 toneladas) de madeira (CGEE, 2015).

Segundo relatório anual da IBÁ (2019), o Brasil é responsável por 11% da produção do carvão vegetal mundial. O país registrou consumo de 4,6 milhões de toneladas em 2018, sendo 91% produzido a partir de madeira proveniente de árvores plantadas; mais de 130 indústrias utilizam o carvão vegetal no processo produtivo de ferro-gusa, aço e ferro-ligas.

Segundo os últimos dados disponibilizados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2018), o Brasil produziu 6.397.000 toneladas, importou 14.767 toneladas e exportou 4.194 toneladas de carvão vegetal de madeira no ano de 2018. Analisando os anos entre 1994 e 2013, a participação do carvão vegetal na produção do ferro-gusa no Brasil apresentou uma média de consumo anual de 6,9 milhões de toneladas, e uma produção média anual de 9,5 milhões de toneladas de ferro-gusa (CGEE, 2015). O rendimento gravimétrico (RG) representa, em base seca, a massa de carvão vegetal obtida em relação à massa de madeira enforada. No processo de pirólise, a tonelada de madeira (base seca) possui um RG em carvão vegetal em torno de 33% (SANTOS, 2017).

Fontes alternativas de biomassa têm sido alvo de pesquisa para a produção de carvão vegetal, como casca do coco babaçu; resíduos da produção do biodiesel derivado do fruto do pinhão manso; processamento do coco macaúba; entre outros (SANTOS, 2017). No entanto, a madeira ainda é a principal matéria-prima para a fabricação do carvão

vegetal, podendo ser dividida em dois grupos principais: madeira nativa (obtida das florestas nativas, no qual as espécies variam conforme a região) e madeira de reflorestamento (obtida através do plantio de espécies para esse fim). O eucalipto é a madeira mais utilizada, devido ao seu rápido crescimento e às propriedades químicas (alta porcentagem de carbono fixo, baixo teor de cinzas), físicas (densidade, propriedade térmica, alto teor de lignina) e econômicas (facilidade de tratamentos silviculturais) (FROEHLICH; MOURA, 2014). Os reflorestamentos de eucalipto, quando planejados e manejados adequadamente, obtêm árvores com troncos uniformes e massa específica ideal para produção de carvão com boa qualidade (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

A madeira é formada por celulose, hemicelulose, lignina e uma pequena quantidade de extrativos e materiais orgânicos. A lignina é responsável pela formação de aproximadamente 50% do carbono fixo na fração sólida. Dessa forma, matéria prima com alto teor de lignina é mais interessante, quando o objetivo é a obtenção de alta concentração de carbono fixo (FROEHLICH; MOURA, 2014).

A conversão energética da biomassa é baseado em processos termoquímicos. A biomassa é submetida à ação do calor até transformá-la em um composto mais simples. A madeira é composta basicamente de carbono, oxigênio, água, hidrogênio, nitrogênio e sais minerais (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012). A pirólise é um processo em que a madeira é submetida ao aquecimento em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de ar. Durante este procedimento são liberados vapores de água, gases e líquidos orgânicos, permanecendo principalmente, o alcatrão e o carvão vegetal (SANTOS, 2017).

Normalmente, o processo de pirólise da madeira ocorre em quatro fases: (i) secagem, no qual a água presente na madeira é evaporada, sem perda de peso seco de madeira; (ii) torrefação, ocorrendo à decomposição da celulose e hemicelulose, dando início a liberação de água de constituição dessas estruturas; (iii) carbonização, etapa em que ocorre a intensificação da decomposição da celulose e hemicelulose, resultando em perda significativa de peso; ao atingir a temperatura de 350 °C possui em média 75% de carbono fixo; (iv) fixação, no qual a partir de 350 °C ocorre diminuição gradual na liberação de elementos voláteis, continuando a fixação do carbono (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012; SANTOS, 2017).

O resultado do processo de pirólise é a formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso). As proporções destes compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado

(FROEHLICH; MOURA, 2014). Dessa forma, a pirólise é a destilação da madeira que se transforma numa fração rica em carbono, denominada carvão vegetal, e outra fração composta por vapores e gases (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

A maior parte da produção do carvão é utilizada nas indústrias; o restante tem fins residenciais e comerciais, tais como pizzarias, churrascarias e padarias (FROEHLICH; MOURA, 2014). O carvão vegetal apresenta importância significativa para a economia do Brasil, principalmente por ser termo-redutor na transformação do minério de ferro em ferro-gusa, ligas metálicas nas siderúrgicas e aço (OLIVEIRA *et al.*, 2015). É considerado um dos melhores redutores para o uso industrial, apresentando elevado grau de pureza quando se comparado ao carvão mineral, e baixo teor de enxofre e cinzas (FROEHLICH; MOURA, 2014).

3.2 GNSS/RTK

Os sistemas de satélite estão em uso desde os anos 1960, sendo os Estados Unidos o país pioneiro na implantação do sistema. Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) referem-se às constelações de satélites artificiais que possibilitam o posicionamento em tempo real de objetos. O sistema é composto por quatro principais conjuntos de satélites (além de alguns conjuntos regionais), sendo eles: GPS (*Global Positioning System*), Estados Unidos; GLONASS, Rússia; GALILEO, União Europeia; BEIDOU/COMPASS, China (SOININEN *et al.*, 2018; ALVES; ABREU; SOUZA, 2013).

O GNSS possui ampla gama de aplicações e fornece precisão que varia de centímetro a metro. Sua principal desvantagem está associada em exigir uma linha de comunicação sem obstáculos entre satélite e receptor para determinação da posição, tais como: edifícios altos, área urbana e floresta com o dossel fechado (ZHU *et al.*, 2018).

Um dos métodos para utilização do GNSS é o Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real, conhecido como RTK (*Real Time Kinematic*). Os equipamentos utilizados para coletar os dados RTK consistem em um par de receptores GNSS: (i) Estação Base, equipamento estacionário que fica instalado em uma coordenada conhecida; e (ii) *Rover* ou base móvel, que fica junto ao usuário executando a coleta de dados. Durante a coleta, a estação base transmite as correções para a estação móvel, dispensando o trabalho de pós processamento para correção dos dados. Esse sistema possibilita a diminuição do tempo de monitoramento para obtenção de ponto fixo, alcançando precisão menor que 10 centímetros. Também é possível realizar trabalhos de

coleta de pontos, altimetrias, linhas, entre outros que não necessitem de precisão melhor que um centímetro (BUSNELLO; TECCHIO; ISOTON, 2016). Os erros envolvidos no processo são proporcionais ao comprimento da linha de base (distância entre a estação base e *rover*), o que limita a distância entre a estação base e *rover* a, aproximadamente, 20 quilômetros (SILVA; MONICO; ALVES, 2016).

O GNSS tem um papel importante no posicionamento de alta precisão, obtendo posições e navegações continuamente precisas. No entanto, a má recepção (quando o campo magnético é alterado durante a passagem do sinal), o movimento de alta velocidade ou a presença de obstáculos podem ocasionar falha nas medições. Ao utilizar o RTK, pode ocorrer perda total de sinal na aquisição dos dados GNSS (ocasionado por presença de obstáculos, regiões declivosas ou interferência da ionosfera), o que pode levar a deterioração considerável da precisão, podendo danificar a confiabilidade dos dados obtidos pelo GNSS/RTK (FENG *et al.*, 2020; SILVA; MONICO; ALVES, 2016).

3.3 Aeronave Remotamente Pilotada

Segundo o regulamento da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018), as aeronaves remotamente pilotadas (RPA) são aeronaves não tripuladas utilizadas para fins não recreativos, como comerciais, experimentais ou institucionais. As RPAs são popularmente conhecidas como drone. Atualmente o Brasil não permite aeronave não tripulada autônoma, em que não há interferência do piloto durante o voo (ORIENTAÇÕES PARA USUÁRIOS DE DRONES, 2017).

Os dois tipos de RPAs são: (i) sistemas de asas fixas: aeronaves que utilizam asas fixas e estáticas que, em combinação com a velocidade do ar para frente, gera sustentação; permite maior autonomia de voo (voos com maior tempo); possibilidade de sobrevoar áreas extensas; necessita de uma pista de pouso e decolagem, pois são realizados na horizontal; (ii) sistema rotativo: são RPAs equipadas com pequenos rotores que são necessários para a estabilidade do equipamento; o número de rotores é variável, geralmente é utilizado pelo menos quatro; são mais fáceis de serem manuseados, ou seja, o operador não necessita de muita experiência. Comparando o multirrotor com a asa fixa, o primeiro necessita de um espaço menor para decolagem e pouso; porém, a bateria tem menor autonomia, normalmente a altura e velocidade dos voos são menores, e são mais instáveis (VERGOUW *et al.*, 2016).

As RPAs são classificadas de acordo com o peso máximo de decolagem, sendo três classificações: (i) Classe 1: RPA com peso máximo de decolagem maior que 150 kg; (ii) Classe 2: RPA com peso máximo de decolagem maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg; (iii) Classe 3: RPA com peso máximo de decolagem menor ou igual a 25 kg (ANAC, 2018).

As operações de voo da RPA também podem ser classificadas quanto à distância entre o piloto remoto e a aeronave: (i) Operação além da linha de visada (BVLOS), quando o piloto remoto não consegue manter a RPA dentro de seu alcance visual; (ii) Operação em linha de visada visual (VLOS), quando o piloto remoto mantém contato visual direto com a RPA; (iii) Operação linha de visada visual estendida (EVLOS), quando o piloto remoto só é capaz de manter contato visual direto com a RPA com auxílio de lentes ou de outros equipamentos e de observadores de RPA (MUNARETTO, 2017).

Segundo a regulamentação da ANAC, o registro da aeronave, necessidade de projeto, limite de idade para operação, certificado médico, licença e habilitação dependem da classe da RPA utilizada (QUADRO 1).

Quadro 1 – Regulamentação segundo a ANAC.

Resumo da Regulamentação da ANAC			
Demanda	RPA		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Registro da aeronave	Sim	Sim	BVLOS: Sim VLOS: Sim
Aprovação/autorização do projeto	Sim	Sim	BVLOS ou acima de 400 pés
Limite de idade para operação	Sim	Sim	Sim
Certificado médico	Sim	Sim	Não
Licença e habilitação	Sim	Sim	Operações acima de 400 pés

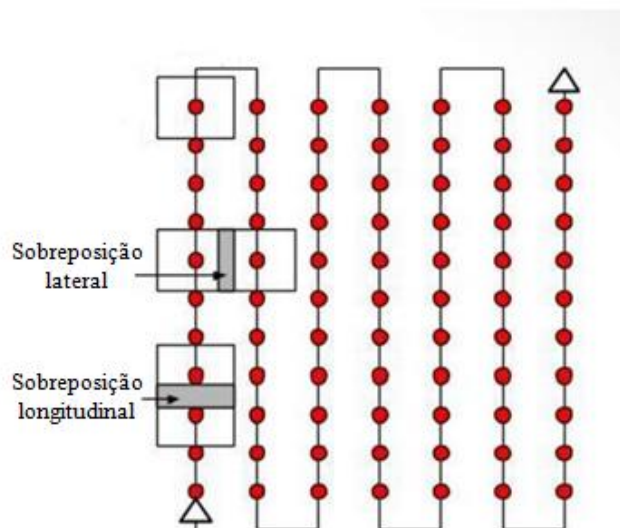
Fonte: Orientações para usuários de drones, 2017. Adaptado.

Para se obter um bom mapeamento com RPA, é necessário definir o plano de voo adequado para a área ou objeto de interesse que será mapeado. Durante a elaboração do plano de voo, é necessário ajustar alguns parâmetros de acordo com o objeto/área a ser sobrevoada, tais como: GSD (Distância de amostra do solo), altura de voo, sobreposição

das fotos aéreas (*overlap*) lateral e longitudinal, tempo do voo, cálculo da área a ser sobrevoada, dentre outros (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018).

O GSD representa o valor em centímetros de quanto um pixel da imagem aérea representa no solo. O valor ideal varia de acordo com o objetivo do trabalho: voos mais baixos obtém menor GSD, ou seja, maior detalhamento do produto final; no entanto, o tempo de voo é maior e o processamento mais demorado (devido ao maior número de imagens). Assim, o GSD está diretamente relacionado com a altura de voo (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018). A sobreposição longitudinal é a área em comum entre duas fotos adjacentes, normalmente dadas em porcentagem, no sentido da linha de voo. A sobreposição lateral é a área em comum nas fotos tiradas em linhas de voo paralelas, normalmente dada em porcentagem (FIG. 1) (MUNARETTO, 2017).

Figura 1 – Sobreposição lateral e longitudinal.



Fonte: CASSEMIRO; PINTO, 2014. Adaptado.

É possível visualizar as equações para cálculo da distância longitudinal (DO) e lateral (DA) percorrida no solo por uma foto, para a área de abrangência de uma imagem (I) e para o cálculo da altura de voo (H) (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018):

$$DO = [(IMW * GSD)/100] \quad (1)$$

$$DA = [(IMH * GSD)/100] \quad (2)$$

$$I = [(IMW * GSD)/100] * [(IMH * GSD)/100] \quad (3)$$

$$H = [(IMW * GSD)/100] * [(f * S)/34,6]/S \quad (4)$$

Em que:

DO = distância longitudinal percorrida no solo por uma foto (m).

DA = distância lateral percorrida no solo por uma foto (m).

IMW = largura da imagem (pixels).

IMH = altura da imagem (pixels).

I = área de abrangência de uma imagem.

H = altura de voo (m).

f = distância focal equivalente a 35 milímetros (mm).

S = largura do sensor (mm).

GSD = Distância de amostra do solo (cm).

A duração ou tempo de cada plano de voo deve ser definido em função da capacidade da bateria, vida útil da bateria, velocidade e direção do vento. Como medida de segurança, o indicado é programar um plano de voo para 65% da capacidade da bateria. O piloto remoto ainda deve incluir nesse intervalo o tempo gasto para a decolagem e pouso da RPA (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018).

Para calcular a distância das linhas laterais para duas imagens adjacentes, tem-se a fórmula a seguir segundo Munaretto (2017):

$$DLL = Lt (1-s)$$

Em que:

DLL é a distância das linhas laterais (m);

Lt é a largura da área coberta (m);

s é o fator de recobrimento (%).

Para o cálculo da distância das linhas de recobrimento longitudinais sucessivas, tem-se a fórmula a seguir segundo Munaretto (2017):

$$DLO = Ct (1 - r)$$

Em que:

DLO é a distância das linhas longitudinais (m);

Ct é o comprimento da área coberta (m);

r é o fator de recobrimento (%).

Para o cálculo do comprimento da área coberta, tem-se a fórmula a seguir segundo Munaretto (2017):

$$Ct = (Cs * H) / Fr$$

Em que:

Ct é o comprimento da área coberta (m);

Cs é o comprimento do sensor (mm);

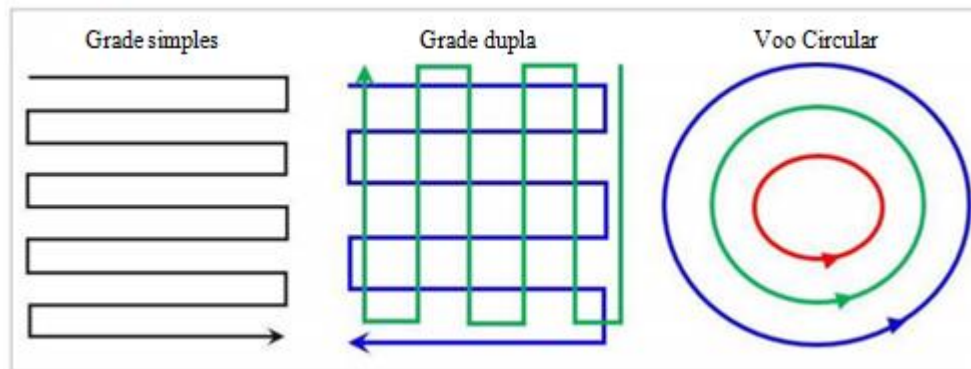
H é a altura da aeronave acima do terreno (m);

Fr é a distância focal (mm).

Normalmente, é recomendado adquirir imagens utilizando padrões de grades regulares. Dessa forma, durante o processamento é possível à identificação mais fácil dos pontos homólogos entre as imagens. Existem também os voos circulares, sendo uma opção nos casos em que o objeto possui formas e restrições espaciais para sobrevoo (FIG. 2) (PARRA; GOMES; SHEBL, 2017).

Os três planos de voos mais utilizados são: (i) Grade simples é recomendado quando o principal interesse é a produção de mapas 2D em locais de superfície relativamente plana e em áreas amplas; (ii) Grade dupla é recomendada quando o principal resultado é a reconstituição tridimensional, locais de superfície com irregularidade ou objetos com variadas alturas e em áreas pequenas ou médias, considerando que o tempo de voo é o dobro quando comparado à grade simples; (iii) Voo circular é recomendado quando o principal resultado é a reconstituição tridimensional de um objeto isolado, que tenha uma altura considerável.

Figura 2 – Planos de voos mais utilizados.



Fonte: PARRA; GOMES; SHEBL, 2017. Adaptado.

São muitos os benefícios da utilização de RPAs, tais como: baixo custo operacional, imagens de alta resolução espacial, coleta de dados com alta frequência e maleabilidade das operações no momento desejado. Normalmente, os RPAs possuem sensores de posição (GNSS), o que facilita o processamento via fotogrametria digital. No entanto, sua utilização é restrita em áreas pequenas devido à capacidade limitada de carga da bateria (PRUDKIN; BREUNIG, 2019).

Podem-se citar quatro aplicações das RPAs na ciência florestal: (i) monitoramento de florestas plantadas e nativas incluindo a detecção de focos de incêndio, mapeamento e monitorização de fogos, visualização da estrutura da floresta, análise do padrão espacial das espécies de interesse, identificação de clareiras, regeneração natural, visualização de áreas inacessíveis ou de difícil acesso, localização de árvores derrubadas, além do auxílio no processo de inventário florestal; (ii) obtenção de imagens georreferenciadas para geração do MDE (Modelo Digital de Elevação) e ortomosaico da área; assim, é possível realizar a contabilização de árvores vivas e mortas, avaliação do estado fitossanitário da floresta, monitorização de pragas e doenças, cálculo da área de copa, análise da distribuição vertical da floresta, quantificação da biomassa, levantamentos cartográficos e topográficos, geração de curvas de nível, e estimativas volumétricas; (iii) monitoramento do uso do solo: identificar alteração do uso do solo, mensurar áreas desflorestadas e reflorestadas, monitorar a alteração da ocupação florestal; (iv) apoiar atividades de colheita florestal: auxilia o planejamento de corte, otimização de rotas e do processo da extração de madeira (SOARES *et al.*, 2015).

3.4 Fotogrametria

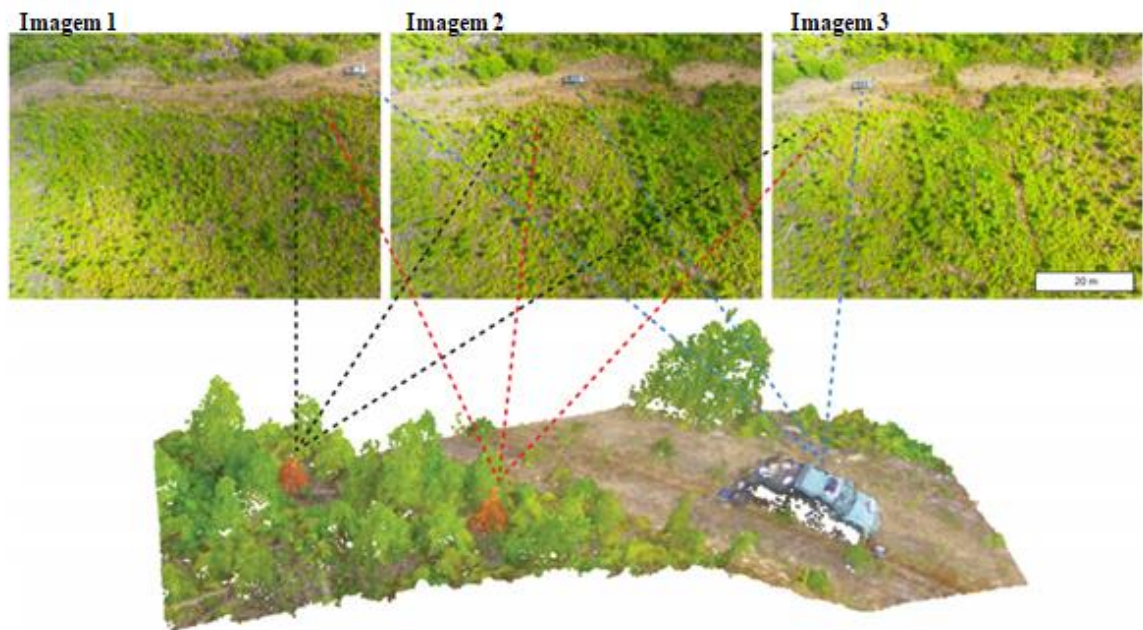
A palavra fotogrametria tem origem de três palavras gregas: “*photos*” que significa luz; “*gramma*”, que significa algo desenhado ou escrito; e “*metron*”, que significa medir. Dessa forma, de acordo com a origem da palavra, fotogrametria significaria "medir graficamente usando luz (TOMMASELLI *et al.*, 1999)." As fotografias aéreas, também chamadas de aerofotos, normalmente são obtidas de forma sequencial, com elevada sobreposição longitudinal e lateral de imagens. Para que as imagens tenham uma boa qualidade e sejam processadas de forma otimizadas, o equipamento que faz a coleta das imagens deverá manter-se na mesma altura, velocidade constante e realizar um percurso do voo. Seguindo essas recomendações, as imagens tenderão a uniformidade (SANTOS, 2013).

Como principal objetivo, a fotogrametria digital tende a reconstruir a área tridimensionalmente, a partir de imagens bidimensionais. A fonte primária utilizada são as imagens digitais, que se apresentam em forma de matriz, onde cada elemento da matriz é chamado de pixel. Um pixel é o menor elemento de uma imagem digital (SCHWUCHOW, 2018).

Quando é realizado um sobrevoo de uma área, as faixas de voo são sobrepostas lateral e longitudinalmente. Dessa forma, um mesmo objeto estará presente em mais de uma imagem. A estereoscopia é a sobreposição entre duas fotografias aéreas consecutivas, possibilitando assim, a visão tridimensional. Ou seja, a partir de duas imagens de um mesmo objeto, tomadas de pontos de vista distintos, é possível obter uma visão tridimensional (FIG. 3). Boa parte dos trabalhos que envolvem a fotogrametria digital necessitam da visualização em três dimensões da área de estudo, principalmente para auxiliar na confecção dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) e dos ortomosaicos (SANTOS, 2013).

A fototriangulação ou aerotriangulação é uma técnica para o cálculo e ajuste das coordenadas dos centros de perspectivas (CPs) no terreno/espaco-objeto e dos ângulos de altitude da câmara no instante em que cada fotografia foi obtida, de forma a alcançar, a partir do espaco imagem, as coordenadas tridimensionais. Ou seja, é o processo que determina as coordenadas de terreno/espaco-objeto dos pontos fotogramétricos selecionados sobre as imagens fotográficas (espaco-imagem) (ESPINHOSA, 2006; COELHO; BRITO, 2007).

Figura 3 – Esquema evidenciando um mesmo objeto em imagens distintas, possibilitando a reconstituição tridimensional.



Fonte: GOODBODY; COOPS; WHITE, 2019. Adaptado.

Para que a fototriangulação seja realizada, é necessário (i) aquisição das coordenadas dos CPs no espaço-objeto/terreno nos respectivos instantes de tomada das fotografias que recobrem a área-alvo do mapeamento; e (ii) conhecer os respectivos ângulos de Euler (ou ângulos de atitude) da câmara aérea para cada imagem adquirida. Um ângulo de rotação em torno de determinado eixo é denominado ângulo de Euler, representando o ângulo de rotação para cada um dos três eixos ortogonais (X, Y e Z) (FIG. 4). O posicionamento de um corpo rígido em um espaço tridimensional pode ser descrito pelos ângulos de Euler. Dessa forma, os parâmetros da orientação exterior de cada imagem, bem como as coordenadas dos pontos fotogramétricos no sistema de terreno/espaço-objeto, serão computados e ajustados simultaneamente (COELHO; BRITO, 2007; MARTINS, 2019).

Uma vez que os pontos homólogos são localizados em imagens distintas, a área sobreposta por duas imagens simultaneamente contém esses pontos. A seleção dos pontos homólogos obedece alguns critérios, tais como: diferentes dos pontos vizinhos; estáveis em relação ao ruído, ou seja, se forem selecionados em uma imagem, provavelmente deve ser selecionado em outra; e ser únicos dentro da imagem, reduzindo o risco de escolher regiões que aparecem em vários lugares da imagem. Os pontos que satisfazem a esses critérios são chamados pontos de interesse (BÖRLIN; IGASTO, 2009).

Figura 4 – Ilustração da captura de imagem evidenciando a rotação para cada eixo ortogonal da RPA com o CP da imagem.



Fonte: MARTINS, 2019; COELHO; BRITO, 2007. Adaptado.

O principal objetivo da fototriangulação é fornecer coordenadas precisas dos pontos necessários à orientação absoluta de modelos fotogramétricos, tanto para a restituição, quanto para a elaboração de ortofotos (ESPINHOSA, 2006). O resultado final é a geração da nuvem de pontos ou pontos fotogramétricos, no qual sua função é materializar o sistema de coordenadas do terreno. Dessa forma, todas as fotos estão posicionadas lado a lado a fim de reconstruir todo o espaço imageado (COELHO; BRITO, 2007).

3.5 Produtos de um aerolevanteamento

Os principais produtos gerados a partir do aerolevanteamento são o Modelo Digital de Elevação (MDE) e o ortomosaico. O MDE representa as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, em que cada elemento ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado

referencial (FAN et al., 2013). Algumas opções para a geração desse produto são: interferometria, fotogrametria digital, levantamento de solo, entre outros. O MDE é uma representação quantitativa da superfície da Terra, podendo ter diferentes aplicações, tais como: modelagem do fluxo de água, estimativa de escoamento, simulação e gerenciamento de inundações, criação de mapas de relevo, visualização e mapeamento de terrenos (MUKHERJEE et al., 2013).

Existem dois tipos de grade utilizada para a geração do MDE: (i) Grade regular: obtida por aquisição regular ou interpolação. Sua principal vantagem é poder ser armazenada e apresentada sem muito esforço computacional. No entanto, como é obtida por interpolação, perde a precisão dos pontos originais; (ii) Rede de triangulação irregular (TIN – *Triangular Irregular Network*): composta pelos pontos originais, ligados três a três, formando triângulos irregulares com propriedades matemáticas bem definidas. O modo como se ligam os pontos é determinado por um algoritmo chamado triangulação de Delaunay, que conecta um ponto apenas a seus vizinhos (COELHO; BRITO, 2007).

O ortomosaico é uma junção de várias ortofotos. Para obter ortofotos, é necessário realizar uma transformação sobre as imagens originais, chamada ortorretificação. As ortofotos tradicionais são as imagens corrigidas diferencialmente usando um modelo digital de elevação (LI et al., 2020). Nesse processo, são retiradas as distorções relativas à rotação da câmara, e eliminadas as distorções relativas ao relevo. Considerando a fotogrametria digital, a ortorretificação é realizada por meio de transformações sobre os números digitais dos inúmeros pixels das imagens de origem. Dessa forma, um ortomosaico é a junção de várias ortofotos com a perspectiva ortogonal, isto é, onde os raios projetivos são paralelos (COELHO; BRITO, 2007; NÓBREGA; MOURA, 2013).

Em aplicações práticas, os ortomosaicos são diretamente usados como mapas de pequena e média escala, mapas atualizados da superfície terrestre, medição de mudanças em florestas nativas, reconstrução tridimensional de cenas urbanas, planejamento de terras, agricultura de precisão, monitoramento de desertificação, levantamento do uso da terra e registro de moradias rurais (LI et al., 2020).

3.6 Estudo da parametrização para o processamento

O ortomosaico pode ser considerado como produto final de um aerolevanteamento. Para isso, deve-se passar por cinco etapas: alinhamento das imagens

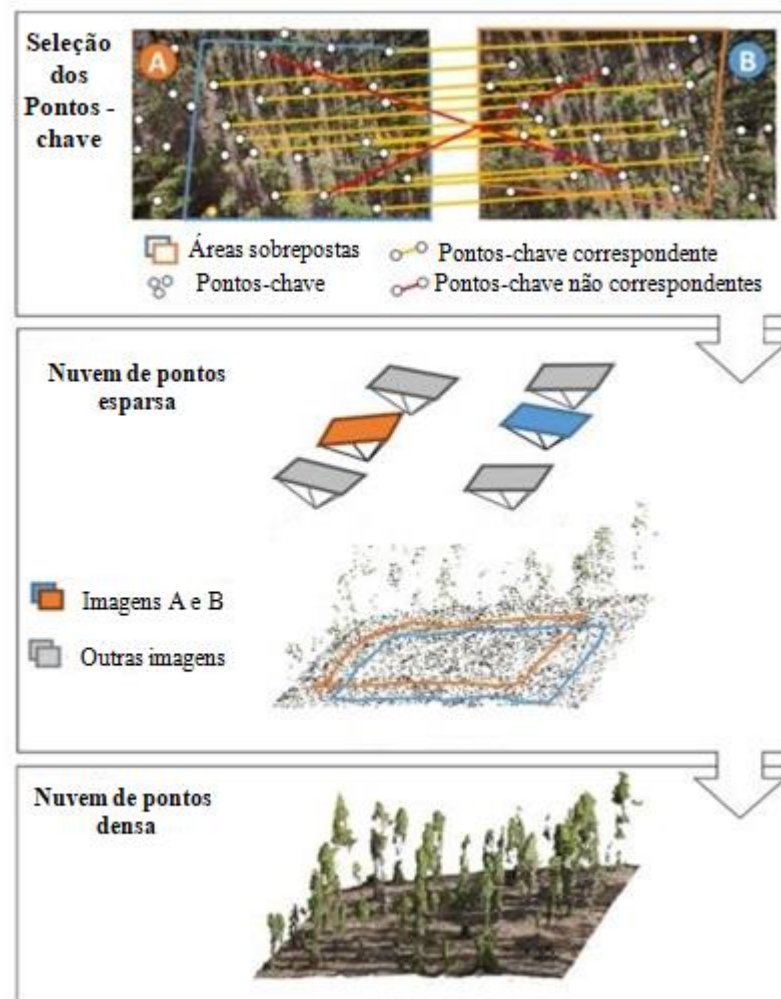
(nuvem esparsa), nuvem densa de pontos, malha tridimensional, MDE e geração do ortomosaico. Em cada etapa é possível configurar vários parâmetros que são essenciais para a geração de um produto final de qualidade, sendo ajustados de acordo com a área imageada (AGISOFT, 2020).

A primeira etapa é o alinhamento das imagens, que depende de seis parâmetros. O primeiro é a acurácia, em que a configuração mais alta ajuda a obter estimativas mais precisas da posição da câmera; recomendada somente para dados de imagem nítida e principalmente para fins de pesquisa, devido ao processamento ser mais demorado. Menor acurácia pode ser usada para obter as posições aproximadas da câmera em um curto período de tempo. As opções de acurácia são: muito alta, alta, média, baixa e muito baixa. O segundo parâmetro é a pré-seleção genérica: o processo do alinhamento de grandes conjuntos de fotos pode levar muito tempo, no qual uma parte significativa é gasta na correspondência de recursos detectados nas fotos; essa opção de pré-seleção de pares de imagens pode acelerar este processo devido à seleção de um subconjunto de pares de imagens a serem correspondidos. Quando ativado, os pares sobrepostos de fotos são selecionados inicialmente por fotos correspondentes usando menor configuração de precisão. O terceiro parâmetro é a pré-seleção de referência, que quando ativado, seleciona os pares de fotos sobrepostos levando em consideração os locais medidos da câmera (se presente). O quarto parâmetro é o limite de pontos-chave, no qual o número indica o limite superior dos pontos em todas as imagens a serem considerados durante estágio de processamento atual; o valor padrão é 40.000 (FIG. 5). O quinto parâmetro é o limite de pontos de amarração, no qual o número indica o limite superior de pontos correspondentes para cada imagem, sendo 4,000 o valor padrão. O sexto e último parâmetro é o modelo de câmera adaptável, em que a seleção automática dos parâmetros da câmera é incluída no ajuste com base em suas estimativas de confiabilidade (AGISOFT, 2020).

A segunda etapa do processamento é a geração da nuvem densa de pontos, que possui três parâmetros para ajuste. O primeiro parâmetro é a qualidade; configurações de alta qualidade podem ser usadas para obter informações mais detalhadas e geometria precisa, mas elas exigem mais tempo para processamento; as opções são: muito alta, alta, média, baixa, muito baixa. O segundo parâmetro é o filtro de profundidade, no qual é calculado mapas de profundidade para cada imagem. Devido a alguns fatores, como imagens ruidosas ou mal focalizadas, pode haver alguns *outliers* entre os pontos. São quatro opções de filtros: (i) Leve: se houver pequenos detalhes importantes que são espacialmente distinguidos na cena a ser reconstruída, para características importantes não

serem classificadas como *outliers*. (ii) Agressivo: se a área a ser reconstruída não contiver pequenos detalhes significativos, então é razoável para escolher o modo de filtragem de profundidade agressiva para classificar a maioria dos *outliers*. Este último é normalmente recomendado para o processamento de dados aéreos. (iii) Moderado: traz resultados que estão entre o suave e agressivo. (iv) Desabilitado: modo de filtragem desativado. Esta opção não é recomendada, pois pode gerar como resultado uma nuvem densa com muitos ruídos. O terceiro e último parâmetro é o cálculo das cores dos pontos: esta opção pode ser desmarcada caso a cor dos pontos não seja de interesse, o que permite economizar tempo de processamento (FIG. 5) (AGISOFT, 2020).

Figura 5 – Esquema representando a seleção dos pontos-chave, geração das nuvens esparsa e densa.



Fonte: IGLHAUT *et al*, 2019. Adaptado.

A terceira etapa do processamento é a geração da malha tridimensional, que possui seis parâmetros para ajuste. O primeiro são os tipos de superfície, sendo elas: (i) Arbitrária: pode ser usado para modelar qualquer tipo de objeto; deve ser selecionado para objetos fechados, como estátuas e edifícios; e (ii) Campo de altura: é otimizado para modelagem de superfícies planas, como terrenos; deve ser selecionado para processamento de fotografia aérea, pois requer menor quantidade de memória e permite o processamento de conjuntos maiores de dados. O segundo parâmetro são os dados de origem, especificando a origem da base para o procedimento de geração da malha: (i) Nuvem esparsa: pode ser usada para malha tridimensional rápida, gerando um modelo baseado unicamente na nuvem de pontos esparsos; (ii) Nuvem densa: resultará em mais tempo de processamento, mas irá gerar uma saída de maior qualidade. O terceiro parâmetro é a contagem das faces, que especifica o número máximo de polígonos na malha final; os valores sugeridos devem ser calculados com base no número de pontos na nuvem de pontos selecionada. Embora um número muito pequeno de polígonos possa resultar em uma malha muito áspera, um número muito grande (mais de 10 milhões de polígonos) provavelmente causará problemas de visualização do modelo. O quarto parâmetro é a interpolação, que possui duas opções: (i) Ativado (padrão): interpolação de algumas áreas de superfície dentro de um círculo de um determinado raio em torno de cada ponto da nuvem; como resultado, alguns furos podem ser automaticamente cobertos. (ii) Extrapolado: geração de um modelo com geometria extrapolada. O quinto parâmetro define as classes da nuvem de pontos densos que serão utilizadas para a geração da malha tridimensional. O sexto e último parâmetro é o cálculo das cores dos vértices; se os dados de origem tiverem informações de cor para os pontos, opcionalmente, é possível calcular as cores dos vértices (AGISOFT, 2020).

A quarta etapa do processamento é a geração do MDE, que possui quatro parâmetros para ajuste. O primeiro é a projeção, podendo ser geográfica, plana ou cilíndrica. O segundo são os dados de origem, podendo ser a partir da nuvem esparsa, malha tridimensional ou nuvem densa; recomenda-se calcular com base nos dados da nuvem densa. O terceiro parâmetro é a interpolação, tendo duas opções: (i) Ativado (padrão): cálculo para todas as áreas da cena que são visíveis em pelo menos uma imagem, sendo esta a opção recomendada. (ii) Extrapolado: geração do modelo com alguns dados de elevação sendo extrapolado até as extensões da caixa delimitadora. O quarto parâmetro são as classes de pontos, o qual permite selecionar a classe que será usada para o cálculo do MDE (AGISOFT, 2020).

A quinta e última etapa do processamento é a geração do ortomosaico, que possui três parâmetros para ajuste. O primeiro é a projeção, podendo ser geográfica, plana ou cilíndrica. O segundo parâmetro é a seleção dos dados de origem, podendo ser: (i) MDE: indicado para o processamento de dados de levantamento aéreo; e (ii) Malha tridimensional: permite criar ortomosaicos para aplicações mais exigentes, como fachadas dos edifícios. O terceiro e último parâmetro é o modo de mesclagem, podendo ser: (i) Mosaico (padrão): implementa abordagem com divisão de dados em vários domínios de frequência que são misturados de forma independente; (ii) Médio: usa o valor médio ponderado de todos os pixels de fotos individuais; e (iii) Desabilitado: o valor da cor do pixel é retirado da imagem (AGISOFT, 2020).

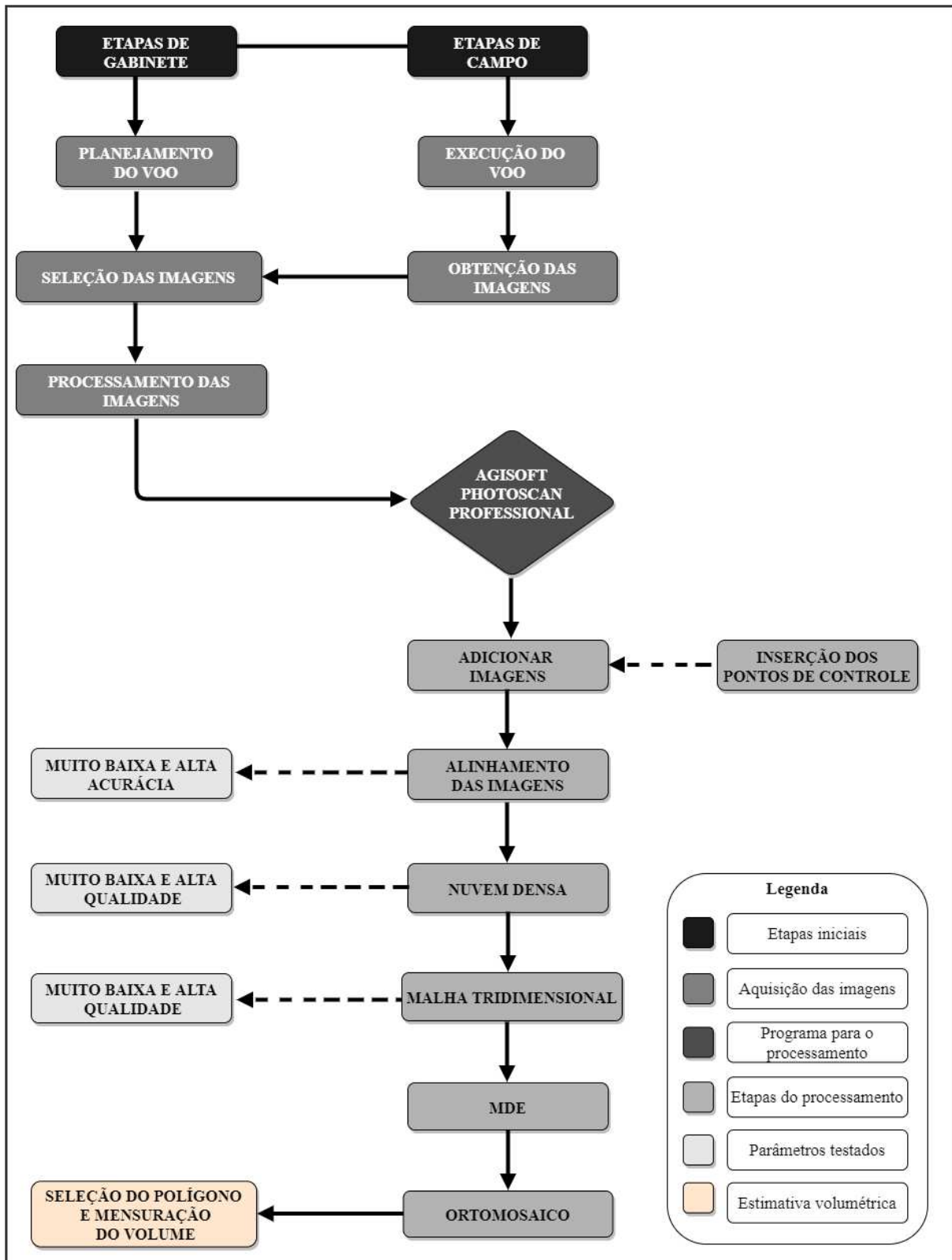
4 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho foi realizado em duas etapas: gabinete e campo (FIG. 6). Inicialmente foi realizado o planejamento e execução do voo, seguido pela obtenção e seleção das imagens; finalizando com o processamento das imagens utilizando o Agisoft Metashape Professional. O processamento foi realizado em cinco etapas: alinhamento das imagens, geração da nuvem densa, malha tridimensional, MDE e ortomosaico. Testaram-se dois processamentos: acurácia muito baixa no alinhamento das imagens, qualidade muito baixa na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces muito baixa na criação da malha tridimensional (M1); e acurácia alta no alinhamento das imagens, qualidade alta na criação da nuvem densa, qualidade e contagem das faces alta na criação da malha tridimensional (M2). Portanto, foram gerados dois MDEs e dois ortomosaicos. Em cada ortomosaico, foi realizada a seleção do polígono para cada pilha de carvão, e sucessivamente, a estimativa volumétrica.

Os pontos coletados pelo GNSS/RTK foram disponibilizados para a pesquisa.

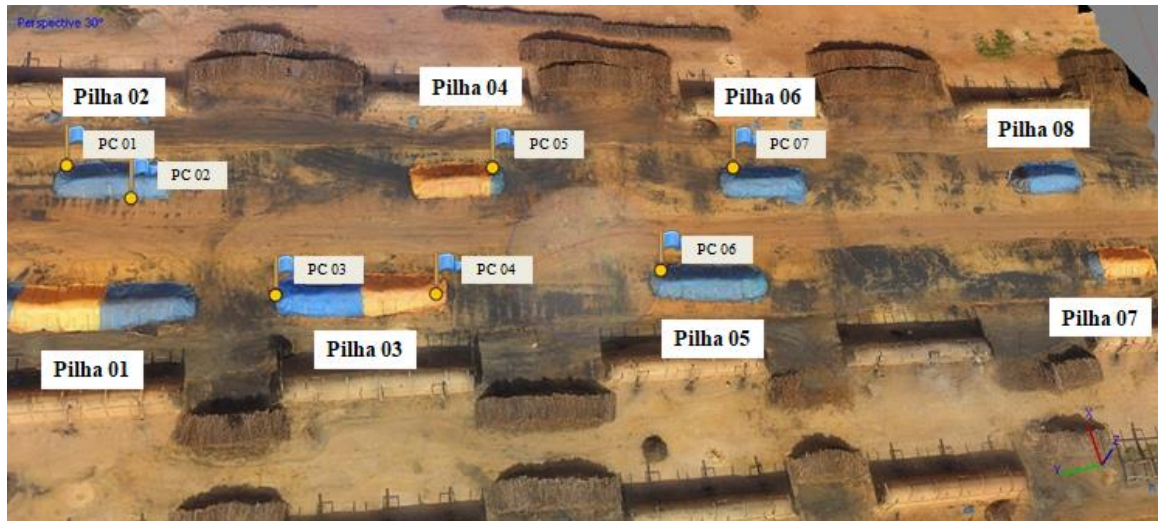
Durante o processamento das imagens, foram utilizados sete pontos de controle (PC) distribuídos na linha das pilhas (FIG. 7). Em cada ortomosaico, criou-se um polígono para cada uma das oito pilhas de carvão a partir da ligação dos pontos RTK nas bordas das pilhas, garantindo a utilização dos mesmos pontos tanto no levantamento topográfico, quanto na estereoscopia digital. O ortomosaico foi gerado a partir do produto MDE, contendo informações de altura. Através de uma ferramenta, o software permite o cálculo do volume das pilhas.

Figura 6 – Fluxograma apresentando o desenvolvimento do trabalho nas etapas de gabinete e campo.



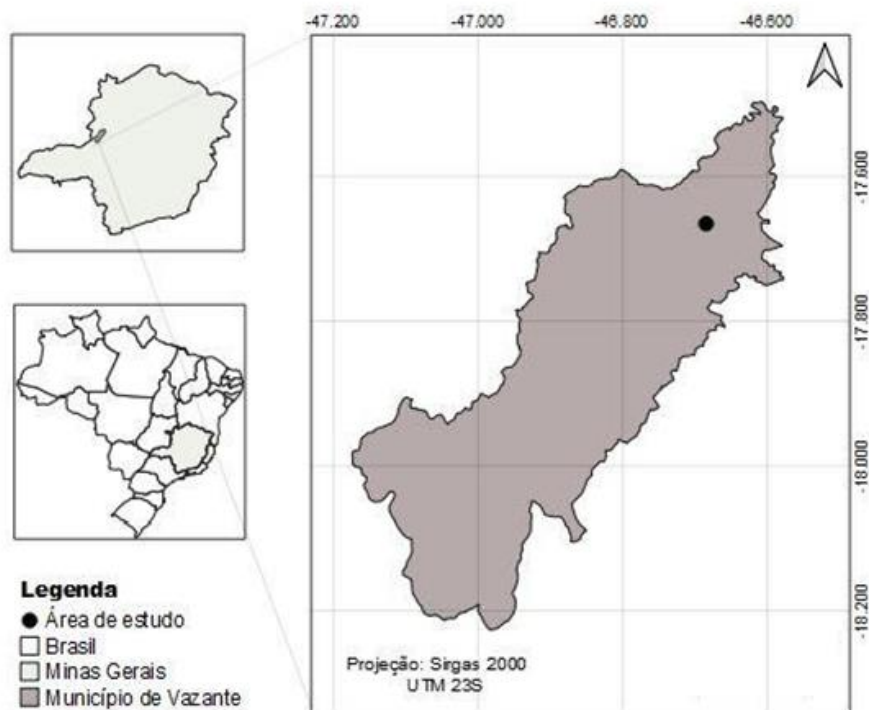
Fonte: autora.

Figura 7 – Identificação das pilhas e pontos de controle utilizados.



A coleta das imagens foi realizada em uma unidade de produção de carvão (UPC) localizada no município de Vazante, em Minas Gerais (MAPA 1). O sobrevoo foi realizado em uma linha de fornos contendo oito pilhas de carvão vegetal, em março de 2018 (FIG. 8).

Mapa 1 – Esquema que representa mapa de localização da área referente ao estudo.



Fonte: autora.

Figura 8 – UPC localizada no município de Vazante, em Minas Gerais.



Fonte: arquivo pessoal.

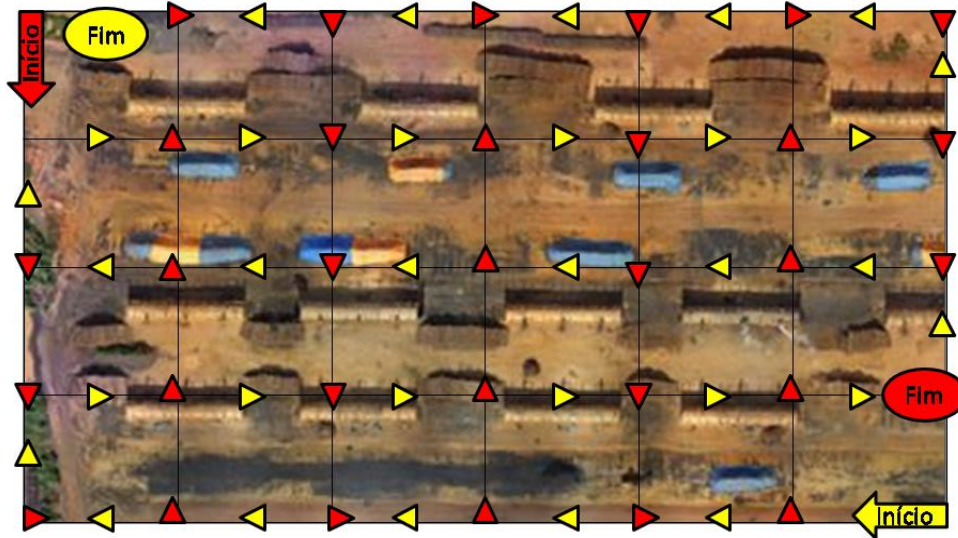
Foi utilizada uma RPA modelo *DJI Phantom 3 Standard* (P3S), multirrotor, com sistema GNSS/GPS integrado, para coletar as imagens. A câmera possui 12 Megapixels e distância focal de 20 mm (formato equivalente 35mm), acoplada a um estabilizador de câmera de três eixos para estabilização eletrônica. Para comando em solo foi utilizado um telefone móvel *Iphone 5s*, com sistema operacional IOS versão 11.3.1.

O aplicativo para o planejamento e execução dos voos foi o Pix4D Capture. Foi utilizada uma grade dupla (FIG. 9), garantindo imageamento multilateral. A angulação da câmera foi definida em 70° e a sobreposição das imagens em 80%. A altura de voo foi de 40 metros, e a distância de amostragem do solo (GSD) de 1,86 cm/pixel. Essas configurações buscam assegurar uma boa reconstituição tridimensional da área imageada. Segundo a literatura, as configurações de altura e sobreposição estão dentro do recomendado (Figueiredo *et al.*, 2016).

O processamento das imagens foi realizado no software Agisoft Metashape Professional, versão 1.6.2, especializado em estereoscopia digital. O hardware empregado para o processamento foi um computador com processador Core i9, 2.9Ghz, 24 núcleos, 128GB de memória RAM e sistema operacional de 64 bits. As imagens foram processadas

testando dois processamentos: M1 e M2 (TAB. 1). Desta forma, como produto final obteve-se (i) dois MDEs e (ii) e dois ortomosaicos.

Figura 9 – esquema exemplificando o grid duplo realizado na área, em que: (i) setas vermelhas representam voo no sentido lateral, seguido pelas (ii) setas amarelas representando voo no sentido longitudinal.



Fonte: autora.

Tabela 1 – Parametrização de cada etapa do processamento.

Etapas	Parametros
Alinhamento das imagens	Acurácia: Muito Baixa ou Alta Pré seleção genérica: Não Pré seleção de referencia: Sim Limite de ponto chave: 40,000 Limite do ponto de amarração: 4,000 Aplicar máscaras: Nenhum Modelo de câmera adaptável: Sim
Otimização do alinhamento	Fit f: Sim Fit cx, cy: Sim Fit b1: Não Fit b2: Não Fit k1: Sim Fit k2: Sim Fit k3: Sim Fit k4: Não Fit p1: Sim Fit p2: Sim Fit p3: Não Fit p4: Não Modelo de câmera adaptável: Não
Nuvem Densa	Qualidade: Muito Baixa ou Alta Filtro de profundidade: agressivo Reutilizar mapas de profundidade: Não Calcular cores dos pontos: Sim
Malha tridimensional	Tipo de superfície: Campo de altura Dados de origem: Nuvem densa Qualidade dos mapas de profundidade: Muito Baixa ou Alta Contagem das faces: Muito Baixa ou Alta Interpolação: Ativado (padrão) Classes de pontos: Todos Reutilizar mapas de profundidade: Não Máscaras columétricas estritas: Não
MDE	Dados de origem: Nuvem densa Interpolação: Ativado (padrão) Classes de pontos: todos Projeção: SIRGAS 2000 / UTM zone 23S Usar região personalizada: Não
Ortomosaico	Superfície: DEM Modo de mesclagem: DEM Preenchimento de furo: Sim Projeção: SIRGAS 2000 / UTM zone 23S Usar região personalizada: Não

Fonte: autora.

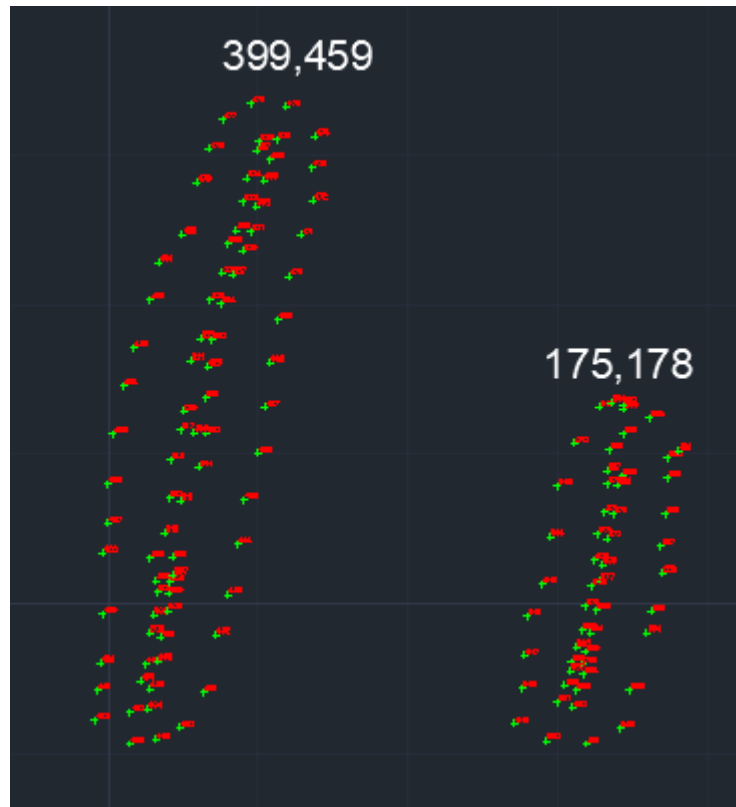
O levantamento de campo foi realizado utilizando pontos de GNSS/RTK, no mesmo dia em que as imagens aéreas foram obtidas. A base fixa do equipamento ficou rastreando os satélites por aproximadamente 3 horas, para estabilização da precisão das coordenadas e da altimetria. Foram coletados 428 pontos ao longo das oito pilhas, sendo necessárias duas pessoas para a operação: uma pessoa andava com o bastão, enquanto a outra pessoa coletava os pontos com o *rover* (FIG. 10). A coleta de campo de duas pilhas pode ser visualizado por meio de duas pilhas utilizando o programa AutoDesk Autocad na FIG. 11. A coleta dos pontos e o processamento do volume com base nos dados GNSS/RTK foram realizados pela empresa e os dados repassados para a pesquisa.

Figura 10 – Coleta dos pontos na UPC utilizando GNSS/RTK.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura 11 – Visualização dos pontos coletados em campo pelo RTK das pilhas de carvão 1 e 2 respectivamente, com os valores de volumetria obtidos.



Fonte: autora.

Os volumes estimados em campo foram comparados com os resultados dos processamentos M1 e M2. A comparação dos três resultados foi feita por meio do teste de hipótese F-Graybill, no qual os volumes foram comparados de forma pareada: RTK com M1; e RTK com M2, considerando o nível de significância a 5% (BRAGA; OLIVEIRA; GORGENS, 2016). O teste de hipótese F-Graybill é a soma dos quadrados dos desvios em relação à média dividida pelo número de observações menos um. Dessa forma, o teste analisa a variância englobando todos os valores, e não apenas a média geral como nos testes de hipótese tradicionais.

5 RESULTADOS

O voo teve duração de 13 minutos, com um total de 380 fotos. As pilhas apresentaram um comprimento variando entre 21,2 e 42,5 metros. A área de voo cobriu aproximadamente 7,6 hectares. Em ambos os processamentos, a qualidade das imagens foi superior a 0,7, índice que garantiu a utilização de todas as imagens. O processamento M1 demorou aproximadamente 24 minutos. Já o processamento M2 demorou cerca de 11 horas e 27 minutos (TAB. 2).

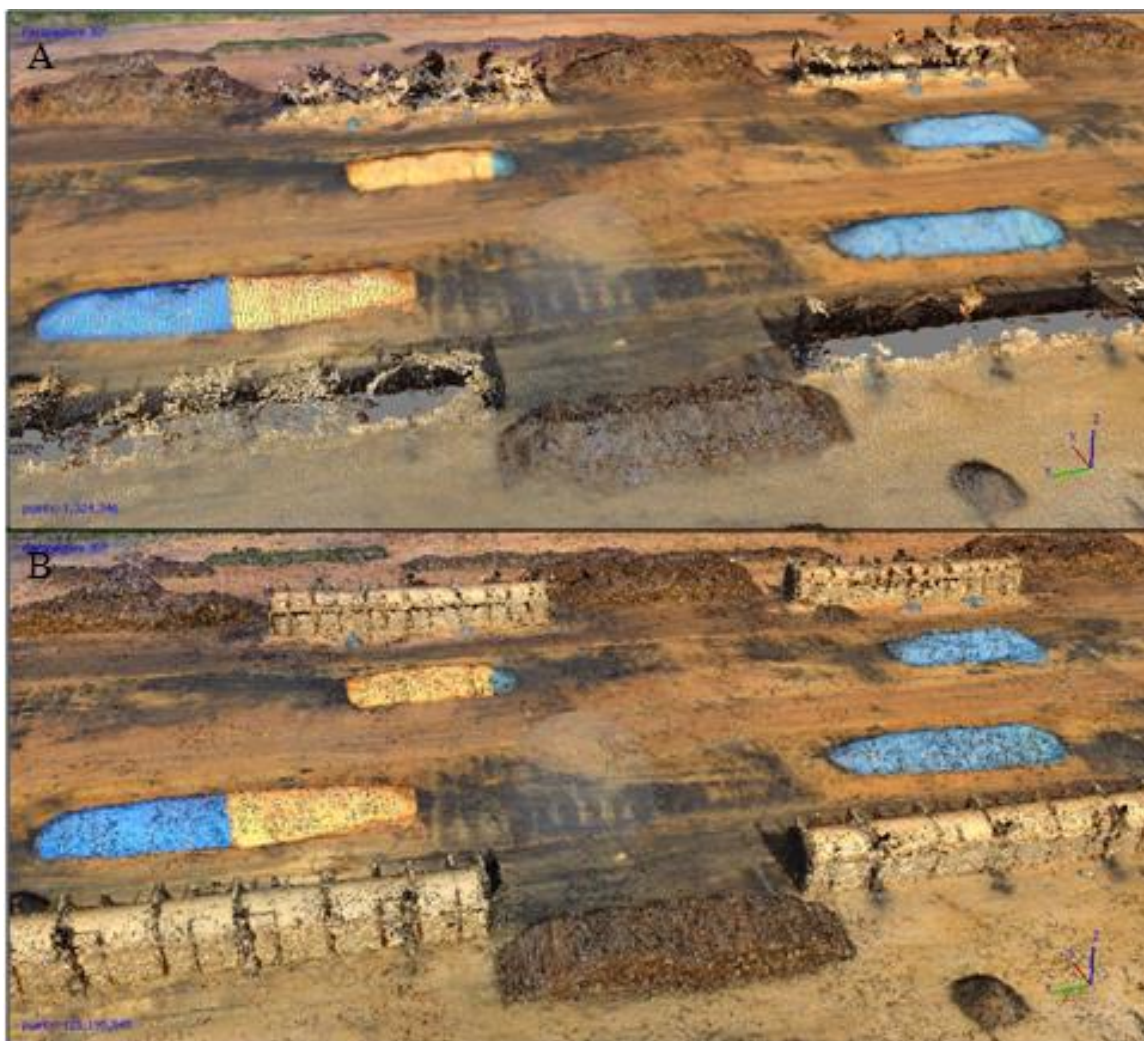
Tabela 2 – Tempo de cada etapa do processamento, considerando as duas qualidades do processamento.

Etapa do processamento	M1		M2		
	Minutos	Segundos	Horas	Minutos	Segundos
Alinhamento	4	20	1	6	30
Nuvem densa	2	42	1	37	35
Malha Tridimensional	14	14	8	23	17
Processamento MDE		6		5	14
Processamento Ortomosaico	3	16		14	53
Tempo total	24	38	11	27	29

Fonte: autora.

Para o processamento, as imagens obtidas pelo drone foram adicionadas ao programa. Em seguida, foi feito o alinhamento das imagens, momento em que se encontra a posição da câmera e orientação para cada foto, resultando na nuvem esparsa de pontos (FIG. 12). É possível observar que, ao comparar os processamentos, a nuvem esparsa de M1 apresenta deformidades nos fornos de alvenaria e nas pilhas de carvão vegetal; o mesmo não acontece na nuvem esparsa de M2.

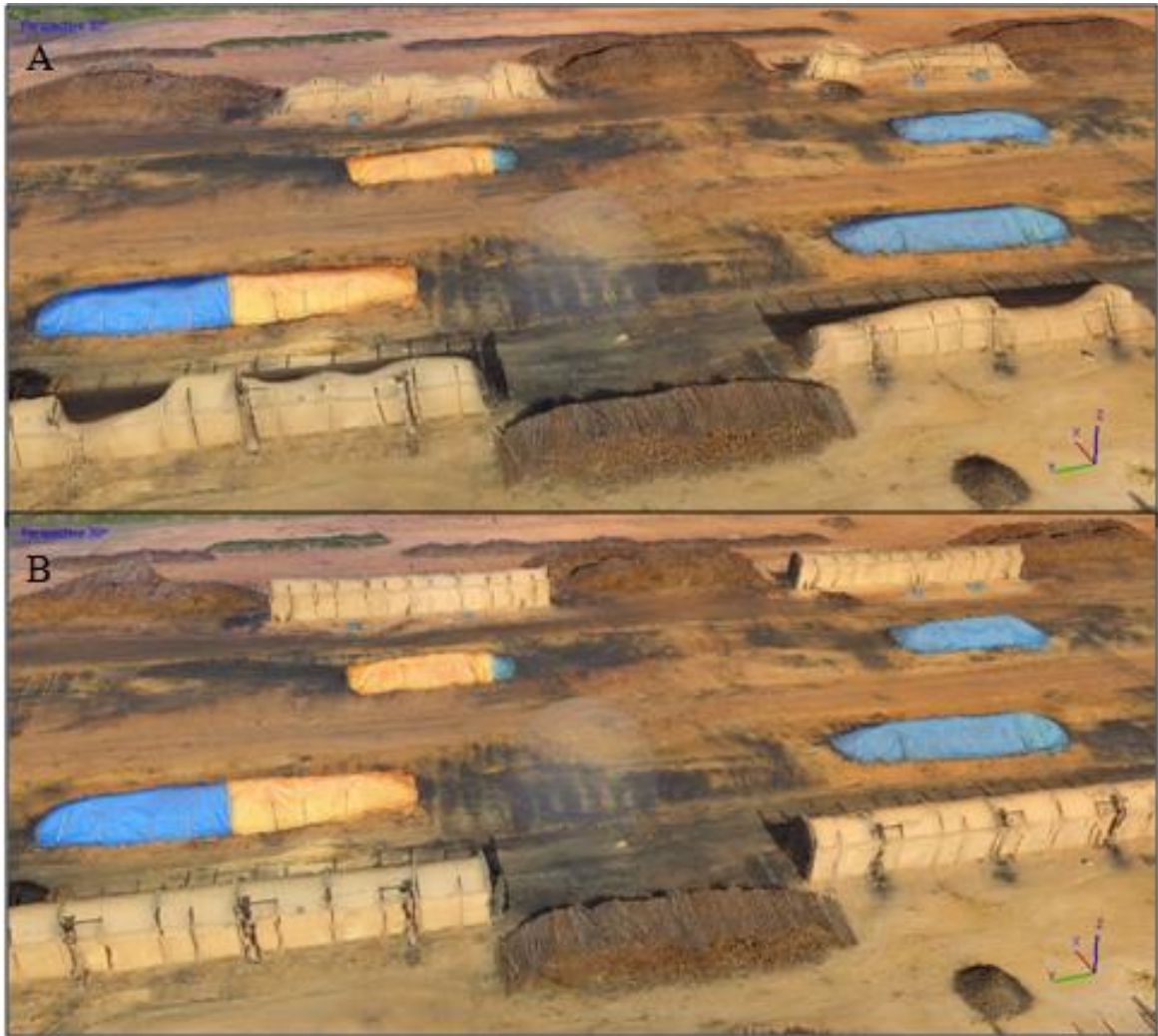
Figura 12 – Alinhamento das imagens, em que A é a nuvem esparsa produto de M1, e B é a nuvem esparsa produto de M2.



Fonte: autora.

Após o alinhamento, foi realizada a geração da nuvem densa. Nessa etapa o software interpola os espaços entre os pontos homólogos já processados, diminuindo os espaços vazios para melhor visualização e representação da área de estudo (FIG. 13). É possível observar que no processamento M2, a nuvem densa é mais nítida e apresenta menos irregularidades quando comparado com o processamento M1.

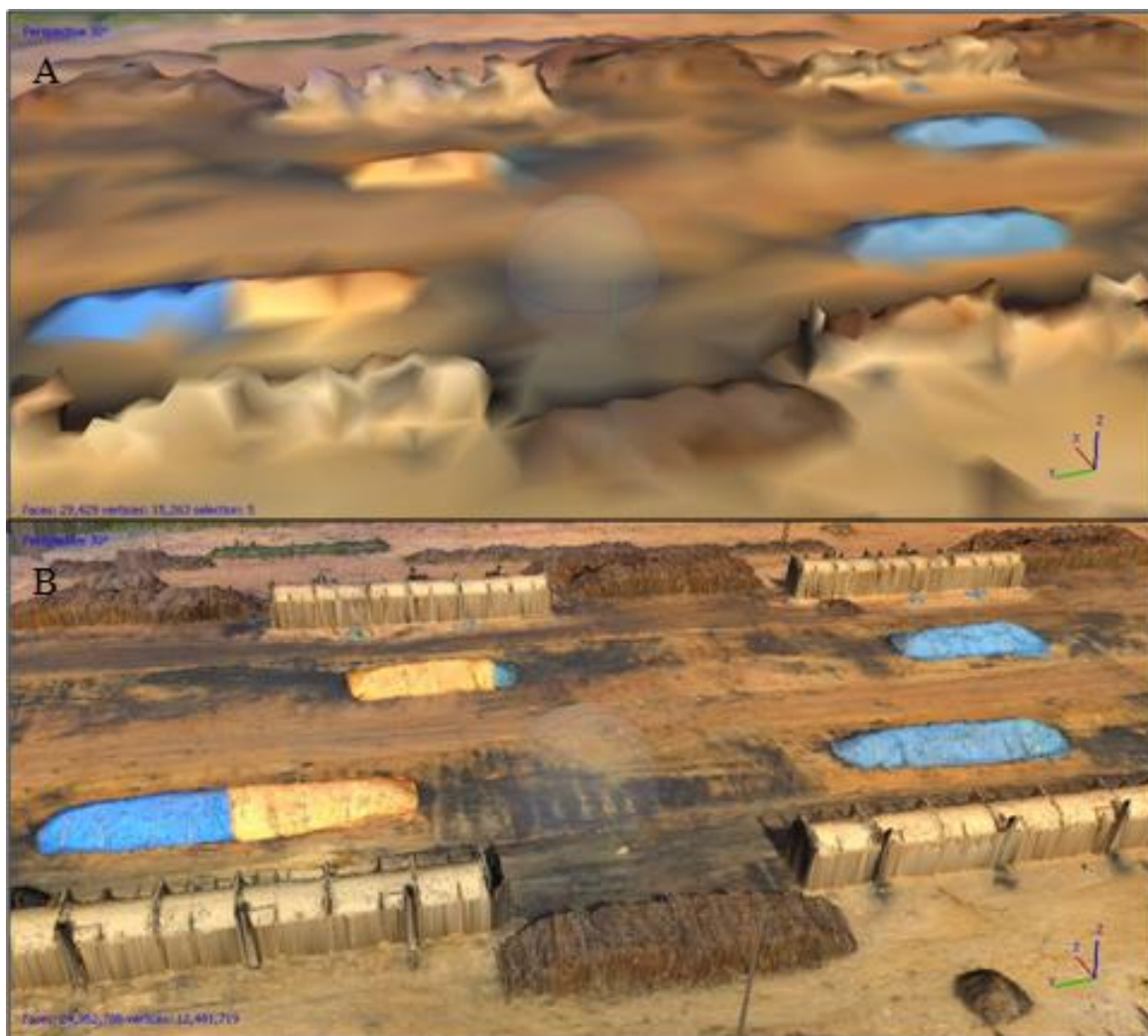
Figura 13 –Nuvem densa, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.



Fonte: autora.

Utilizando a nuvem densa de pontos, foi produzida a malha tridimensional. Neste produto é possível a visualização tridimensional exata da linha sobrevoada, dos fornos de alvenaria e das pilhas de carvão (FIG. 14). Pode-se observar que no processamento M2, a reconstituição é mais nítida quando comparado com o processamento M1.

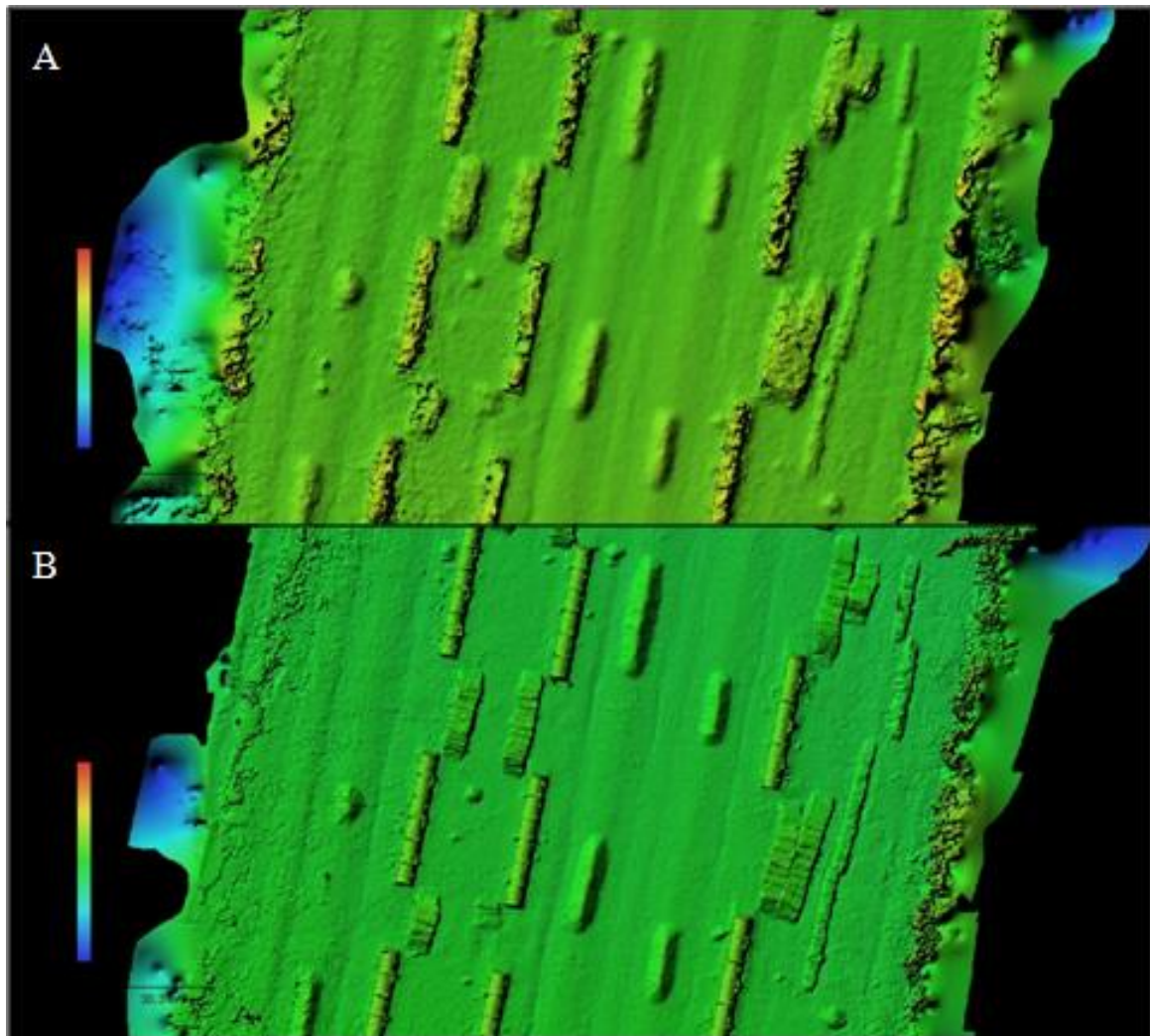
Figura 14 – Reconstrução tridimensional, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.



Fonte: autora.

Em seguida, é gerado o MDE a partir da nuvem densa. O produto representa uma grade regular contendo os valores de altura (FIG. 15). É possível observar que no processamento M2, a variação da altura é mais evidente e nítida quando comparado com M1.

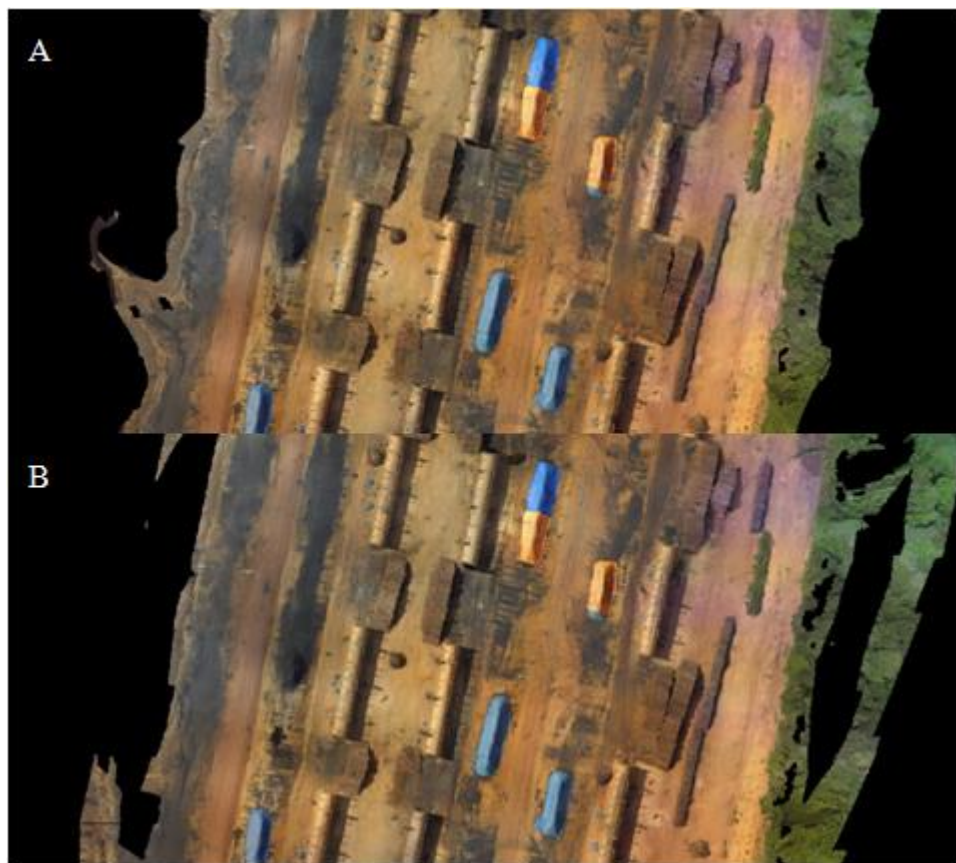
Figura 15 – MDE em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.



Fonte: autora.

Como produto final, tem-se o ortomosaico. Esse produto é confeccionado utilizando o MDE e as fotos georreferenciadas (FIG. 16). Observando o processamento M1, é possível visualizar algumas falhas nas bordas da imagem. O mesmo não ocorre no processamento M2.

Figura 16 – Ortomosaico, em que A é o processamento M1, e B é o processamento M2.



Fonte: autora.

A partir da vetorização de cada pilha no ortomosaico, foi possível realizar a estimativa volumétrica para M1 e M2 (TAB. 3). Observando os volumes, o processamento M1 apresentou menor valor; já M2 apresentou valores maiores. É possível observar também que os valores de M1 se aproximam mais dos valores RTK.

Tabela 3 – Volume das pilhas de carvão obtidos pelos processamentos M1, RTK e M2 em m³.

Volume (m ³)			
Pilha	M1	M2	RTK
1	414,995	437,823	399,459
2	158,928	170,836	175,178
3	334,994	382,018	353,921
4	143,321	161,246	149,692
5	277,708	270,915	243,431
6	185,807	194,657	179,501
7	129,067	152,746	143,105
8	148,669	165,443	151,936
Soma	1.793,489	1.935,684	1.796,223

Fonte: autora.

Comparando a diferença em m³ dos resultados dos volumes por pilhas, é possível observar que o processamento M1 apresenta uma diferença média de 14,372 m³ (6,54%) quando comparado com os valores médios obtidos pelo RTK. Já o processamento M2 apresenta uma diferença média de 18,518 m³ (7,89%) quando comparado com a média do RTK (TAB. 4).

Analisando os valores da mediana e média, observa-se que eles não são próximos nos três processamentos, o que a priori indica que os dados não possuem uma distribuição normal. Analisando a distribuição dos dados, pode-se observar que os três casos apresentam leve assimetria com maior concentração dos dados à esquerda da curva, ou seja, assimetria positiva. O valor da curtose nos três casos foi negativa, o que indica uma distribuição platicúrtica nos extremos da curva, quando comparado com uma distribuição normal (TAB. 5).

Tabela 4 – Diferença em m³ e percentual dos processamentos M1 e M2, quando comparados ao RTK.

Pilhas	M1		M2	
	Diferença (m ³)	Diferença em %	Diferença (m ³)	Diferença em %
1	15,536	3,889	38,364	9,604
2	16,250	9,276	4,342	2,479
3	18,927	5,348	28,097	7,939
4	6,371	4,256	11,554	7,719
5	34,277	14,081	27,484	11,290
6	6,306	3,513	15,156	8,443
7	14,038	9,810	9,641	6,737
8	3,267	2,150	13,507	8,890
Média	14,372	6,540	18,518	7,888

Fonte: autora.

Tabela 5 – Análise estatística.

Variáveis	M1	M2	RTK
Mediana	172,4	182,7	177,3
Média	224,2	242,0	224,5
Desvio Padrão	99,104	103,948	93,316
Skewness	0,663	0,741	0,752
Kurtosis	-1,351	-1,338	-1,321

Fonte: autora.

No processamento da nuvem densa, o número de pontos para o processamento M2 é 94 vezes maior quando comparado ao M1. Considerando a etapa de confecção da malha tridimensional, o número de triângulos no processamento M2 é 853 vezes superior quando comparado ao M1. Dessa forma, o processamento M2 possui um nível de detalhamento superior quando comparado ao M1. Esse fato também é perceptível ao analisar os valores da resolução do MDE dos processamentos, que foi 26,3 e 3,16 cm/pix para M1 e M2, respectivamente. Conclui-se que o processamento M2 possui uma melhor resolução, e consequentemente, maior precisão.

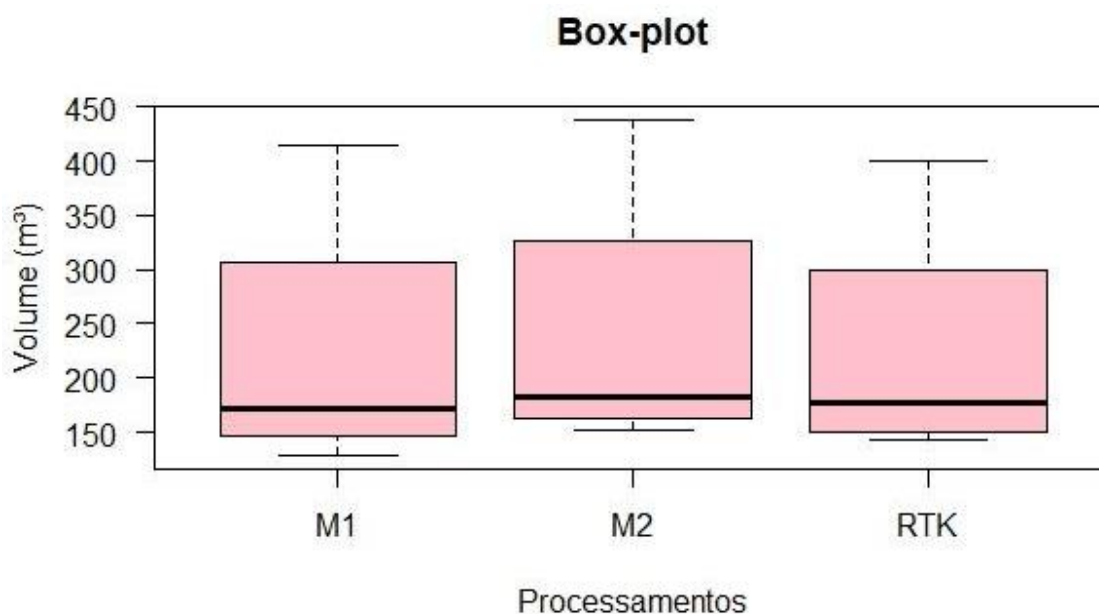
Tabela 6 – Número de pontos na nuvem densa, números de triângulos na malha tridimensional, resolução do MDE e ortomosaico (cm/pix) para os processamentos M1 e M2.

Dados	M1	M2
Número de pontos na nuvem densa	1.324,346	125.615,683
Número de triângulos na malha tridimensional	29,429	25.123,136
Resolução MDE (cm/pix)	26,3	3,16
Resolução ortomosaico (cm/pix)	1,64	1,58

Fonte: autora.

Com o objetivo de visualizar os dados dos três processamentos para a estimativa do volume, foi construído um gráfico box-plot (GRAF. 1), onde é possível observar a dispersão e assimetria dos dados. Observando o gráfico do box-plot é possível visualizar que o processamento M1 obteve volumes menores que no processamento M2. Em todos os processamentos, é possível identificar uma assimetria dos volumes, sendo que estão mais dispersos acima da mediana. O Box-plot não mostrou a presença de outliers.

Gráfico 1 – Box-plot para os processamentos M1, M2 e RTK.

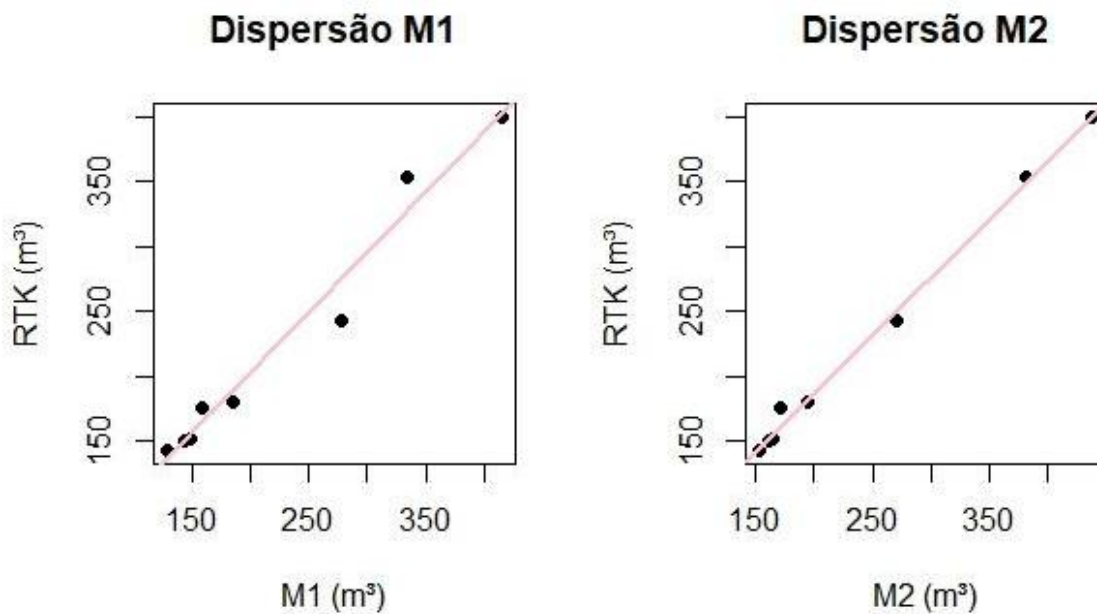


Fonte: autora.

Analisando os gráficos de dispersão, é possível observar que os volumes estão pouco dispersos entorno da reta, o que indica uma alta correlação entre os dados RTK e ambos os processamentos (GRAF. 2). Pode-se observar também que ambos possuem uma tendência crescente, ou seja, a correlação dos gráficos é positiva. Conclui-se que os

volumes obtidos pela estereoscopia digital possuem alto nível de correlação com o método RTK.

Gráfico 2 – Gráficos de dispersão para os processamentos M1 e M2, quando comparados ao RTK.



Fonte: autora.

A comparação entre os três resultados foi feita por meio do teste de hipótese F-Graybill, considerando o nível de significância de 5%. Analisando os processamentos RTK e M1, o p-valor encontrado foi 0,8115, concluindo que os processamentos são estatisticamente iguais. Comparando os processamentos RTK e M2, o p-valor encontrado foi 0.001078, concluindo que os valores são estatisticamente diferentes.

6 DISCUSSÃO

O primeiro ponto que os resultados deste trabalho evidenciam é que a determinação do volume das pilhas de carvão por RTK pode estar apresentando desvios significativos em relação ao volume real. A origem do desvio, certamente não é o equipamento em si, mas a metodologia de levantamento dos pontos representativos da pilha. O parâmetro de acurácia na etapa do alinhamento das imagens é responsável pela estimativa da posição da câmera e orientação das imagens; o parâmetro de qualidade na etapa da densificação da nuvem de pontos é responsável pela precisão geométrica; e os parâmetros de qualidade e contagem das faces na etapa da malha tridimensional especifica o número máximo de polígonos na malha final a ser gerada (AGISOFT, 2020). Por este motivo, o resultado de M2 está tecnicamente mais próximo do volume real, quando comparado com M1 e RTK.

A formação da nuvem esparsa consiste na identificação dos pontos-chave em cada imagem. Essa identificação produz descritores numéricos para cada ponto da imagem, sendo invariante à escala de orientação, adequando-se para identificar pontos em fotos tiradas de diferentes perspectivas. Em seguida, os pontos-chaves são amarrados nas imagens onde aparecem, etapa a qual a nuvem esparsa é formada (IGLHAUT *et al*, 2019). Apesar do número configurado para os pontos-chave e amarração serem os mesmo para os dois processamentos, a qualidade foi diferente, o que implica no critério de escolha desses pontos, sendo diferente para cada processamento. Da mesma forma ocorre na formação da nuvem densa e malha tridimensional. Foi observado que em M2 houve um maior número de pontos nas duas etapas e maior número na contagem das faces, quando comparado com M1.

Quanto maior a qualidade no processamento, maior será o número de pontos-chave e maior será a precisão geométrica. Porém, qualidade mais alta demanda mais tempo de processamento. Iqbal, *et al*. (2018) realizaram alguns testes de parametrização do processamento e concluiu que a nuvem de pontos é influenciada pelo processamento, e cita que a velocidade de processamento é determinada pelos componentes de hardware.

No processo de vetorização das pilhas, foi considerado os pontos coletados pelo RTK nas borda das lonas das pilhas de carvão para melhor comparação dos três processamentos. É possível visualizar que nem sempre o carvão acompanha a delimitação do polígono, podendo extrapolar ou estar mais no interior da borda da lona. Para um melhor resultado, pode-se coletar mais pontos RTK nas bordas das lonas das pilhas, a fim de

diminuir algum erro existente. Estes são ajustes operacionais que a empresa pode adotar para melhorar o processo de medição.

Existem poucos estudos utilizando aerofotogrametria para estimativa de volume, e estes têm apresentado resultados positivos. Anifantis *et al.* (2019) compararam três métodos diferentes para estimar o volume de linhas de árvores. O método que utilizou fotogrametria de curto alcance do RPA apresentou alta precisão nos resultados. Os autores também foi utilizaram pontos de controle que foram posicionados no solo para correlacionar as posições de GPS das imagens obtidas pela RPA.

Raeva, Filipova e Filipov (2016) desenvolveram um estudo para comparar a estimativa volumétrica de uma pedreira. Compararam-se dados GNSS/GPS e imagens coletadas por RPA; a precisão encontrada foi de aproximadamente 3%. Rahman *et al.* (2017) utilizaram imagens de um RPA para cálculo do volume de água de um tanque, obtendo um erro de 5%. Mokros *et al.* (2016) desenvolveram um estudo para estimar volume de pilhas de aparas de madeiras, comparando imagens obtidas pela RPA e pontos GNSS coletados em campo. O volume calculado a partir dos pontos GNSS foi menor em média 10,4% do que o volume calculado a partir das imagens RPA. O autor relaciona este fato com o maior número de pontos obtidos no processamento das imagens, quando comparado ao método GNSS.

Considerando que o erro apresentado pelo RTK seja tolerado pela empresa, é possível substituir a coleta dos pontos RTK por RPA com ganhos significativos de frequência de levantamento e segurança. Na coleta com RTK é necessário que o operador caminhe sobre as pilhas de carvão segurando o bastão para coletar os pontos, podendo resultar em queda ou deslize. Um ponto importante a ser ressaltado é a frequência das coletas. Com o RTK a mensuração do volume das pilhas é realizada semestralmente, por ser um método oneroso e terceirizado. Ao adquirir uma RPA, a empresa poderá realizar essas mensurações quando for necessário: diária, semanal ou mensalmente; o que acarretará no ganho de controle do volume de carvão estocado no pátio. É importante ressaltar que os dados aerofotogramétricos foram coletados mais rápido do que os pontos GNSS/RTK, e que ambos exigem uma etapa de processamento.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo propôs uma metodologia inovadora para mensuração do volume de pilhas de carvão, a partir da estereoscopia digital utilizando a aerofotogrametria embarcada em RPA. O processamento M1 resultou em menor qualidade do ortomosaico, devido à baixa acurácia na formação da nuvem esparsa e baixa qualidade na geração da nuvem densa. Como consequência, houve menor precisão do volume gerado, mas o suficiente para apresentar resultado semelhante ao procedimento operacionalmente usado pela empresa.

Comparando o RTK com M2, a diferença entre eles pode ser associada ao fato de que existe maior número de pontos obtidos no processamento M2, o que resulta em uma maior precisão dos volumes. Os volumes obtidos pelo RTK e M1 são iguais estatisticamente; espera-se que em ambos os métodos o volume esteja sendo subestimado.

Conclui-se que, para a estimação do volume de pilhas de carvão utilizando aerofotogrametria embarcada RPA, recomenda-se o processamento considerando a parametrização aplicada em M2 se desejado ganhos de precisão. Caso o levantamento RTK atender às expectativas da empresa, o procedimento M1 pode ser adotado sem perda de informação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, J. C. Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort–kiln (Eco-charcoal). **Renewable Energy**, [S.l.], v. 34, n. 8, p. 1923-1925, jan. 2009.

AGISOFT, L. L. C. **Agisoft Metashape user manual**: professional edition. Version 1.6, 2020.

ALVES, D. B. M.; ABREU, P. A. G. de.; SOUZA, J. S. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 2-7, mar. 2013.

ANAC - Agencia Nacional de Aviação Civil. **Drones**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones#:~:text=Pelo%20regulamento%20da%20ANAC%2C%20aeromodelos,como%20experimentais%2C%20comerciais%20ou%20institucionais>. Acesso em: 25 jun. 2020.

ANAC - Agencia Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro. Especial–RBAC–E nº 94. **Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. Resolução**, n. 419, 2018.

ANIFANTIS, A. S. *et al.* Comparison of UAV Photogrammetry and 3D Modeling Techniques with Other Currently Used Methods for Estimation of the Tree Row Volume of a Super-High-Density Olive Orchard. **Agriculture**, [S.l.], v. 9, n. 11, p. 233, out. 2019.

AVILA, C. B. de. **Aplicabilidade de imagens obtidas a partir de aerofotogrametria realizada com aeronave remotamente pilotada como subsídio à gestão ambiental**. 2019. 223 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

BÖRLIN, N.; IGASTO, C. **3D measurements of buildings and environment for harbor simulators**. Report: UMINF, [S.l.], v: 19, 63 p., 2009.

BRAGA, S. R.; OLIVEIRA, M. L. R. de.; GORGENS, E. B. Graybill App: Aplicativo shiny para o teste F de Graybill, 2016. Disponível em: <https://sites.google.com/view/forestsuite/home>. Acessado em: 17 jun. 2020.

BUSNELLO, F. J.; TECCHIO, D.; ISOTON, F. Acurácia entre levantamento topográfico com gnss pós processamento e rtk para atender ao georreferenciamento de imóveis rurais. **Revista Tecnológica**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 16-25, maio 2016.

CASSEMIRO, G. H. M.; PINTO, H. B. **Composição e processamento de imagens aéreas em alta resolução obtidas com drone**. 2014. TCC (Graduação) - Engenharia Eletrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia – Brasília: **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, 2015.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Eduerj, 2007. 196 p.
 DUPIN, A. *et al.* The taphonomic characterization of a charcoal production platform. Contribution of an innovative pair of methods: Raman analysis and micromorphology. **Journal Of Archaeological Science**, [S.l.], v. 107, p. 87-99, jul. 2019.

ESPINHOSA, D. R. S. **Influência da injeção da base na fototriangulação de imagens obtidas com uma unidade de mapeamento móvel**. 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

FAN, F. M. *et al.* Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 241-257, jul/set. 2013.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forestry Production and Trade**. Dados referentes ao ano de 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 01 jul. 2020.

FENG, W. *et al.* Fast cycle slip determination for high-rate multi-GNSS RTK using modified geometry-free phase combination. **Gps Solutions**, [S.l.], v. 24, n. 2, p. 42, fev. 2020.

FIGUEIREDO, E. O. *et al.* **Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)**. Rio Branco: Embrapa Acre - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2016. 41 p.

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó; FIGUEIREDO, Symone Maria de Melo. **Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3**. Rio Branco: Embrapa Acre - Circular Técnica, 2018. 56 p.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologia e Tendências**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 13-32, jan./jun. 2014.

GIANNETTI, F. *et al.* A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data. **Remote Sensing Of Environment**, [S.l.], v. 213, p. 195-205, ago. 2018.

GOODBODY, T. R. H.; COOPS, N. C.; WHITE, J. C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions. **Current Forestry Reports**, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 55-75, 2019.

IBÁ [Indústria Brasileira de Árvores]. **Relatório 2019**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2020.

IGLHAUT, J. *et al.* Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. **Current Forestry Reports**, [S.l.], v. 5, n. 3, p. 155-168, 2019.

- IQBAL, I. A. *et al.* Evaluating the robustness of point clouds from small format aerial photography over a *Pinus radiata* plantation. **Australian Forestry**, [S.l.], v. 81, n. 3, p. 162-176, 2018.
- JAYATHUNGA, S.; OWARI, T.; TSUYUKI, S. Evaluating the Performance of Photogrammetric Products Using Fixed-Wing UAV Imagery over a Mixed Conifer–Broadleaf Forest: Comparison with Airborne Laser Scanning. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 187, jan. 2018.
- KRAUSE, S. *et al.* UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 11, n. 7, p. 758, mar. 2019.
- KREBS, P. *et al.* The selection of suitable sites for traditional charcoal production: ideas and practice in southern Switzerland. **Journal of Historical Geography**, [S.l.], v. 57, p. 1-16, maio 2017.
- LI, T. *et al.* A Review of True Orthophoto Rectification Algorithms. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, Chengdu, v. 780, n.2, p. 022035, jun. 2020.
- Martins, R. M. F. **Controlo de Quadcopter**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Eletrotécnica, Universidade da Madeira, [S.l.], 2019.
- MOKROS, M. *et al.* Unmanned aerial vehicle use for wood chips pile volume estimation. In: **Isprs - International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, 2016, Prague, v. 41, p. 953-956, jun. 2016.
- MUKHERJEE, S. *et al.* Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [S.l.], v. 21, p. 205-217, abr. 2013.
- MUNARETTO, L. **Vant e Drones: a aeronáutica ao alcance de todos**. 2. ed. São José dos Campos: Edição do Autor, 2017. 176 p.
- NÓBREGA, D. G.; MOURA, S. R. **Mapeamento planialtimétrico para estudo de viabilidade na implantação de reservatórios de água na zona sul de porto alegre utilizando métodos fotogramétricos**. 2013. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Cartográfica, Departamento de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- NORGATE, T.; LANGBERG, D. Environmental and Economic Aspects of Charcoal Use in Steelmaking. **Isij International**, [S.l.], v. 49, n. 4, Clayton, p. 587-595, jan. 2009.
- OKODE, M. O. *et al.* Socio-Economic and Environmental Impacts of Charcoal Production in South Gem Sub-County, Siaya County, Kenya. **Eph - International Journal Of Educational Research**. Nigeria, v.6, n.6, p. 1-19. jun. 2020.
- OLIVEIRA, A. C. *et al.* Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 769-778, 2015.
- OLIVEIRA, P. C. de. **Estudo do controle de formação e retomada de pilhas de minério**. 2015. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tratamento de Minérios, Universidade

Federal de Goiás, Catalão, 2015.

OLIVEIRA, R. L. M. de. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

ORIENTAÇÕES PARA USUÁRIOS DE DRONES. **ANAC**, 2017. Assessoria de Comunicação Social – ASCOM. Disponível em: http://www.alphavillemg.com.br/wp-content/uploads/2018/08/orientacoes_para_usuarios-1.pdf. Acesso em: 18 junho 2020.

OTA, T. *et al.* Forest Structure Estimation from a UAV-Based Photogrammetric Point Cloud in Managed Temperate Coniferous Forests. **Forests**, [S.l.], v. 8, n. 9, p. 343, set. 2017.

PARRA, H.; GOMES, J. S.; SHEBL, H. Integrated Workflow For Building 3d Digital Outcrop Models Using Unmanned Aerial Vehicles - Drones: Field Case Thamama Group, Wadih Rahbah, UAE. **Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference**, [S.l.], v. 1, p. 1-14, ago. 2017.

PRUDKIN, G.; BREUNIG, F. M. (org.). **DRONES E CIÊNCIA: teoria e aplicações metodológicas**. Santa Maria: Facos-ufsm, 2019. 126 p.

PULITI, S.; SOLBERG, S.; GRANHUS, A. Use of UAV Photogrammetric Data for Estimation of Biophysical Properties in Forest Stands Under Regeneration. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 233, jan. 2019.

RAEVA, P. L.; FILIPOVA, S. L.; FILIPOV, D. G. Volume computation of a stockpile – a study case comparing gps and uav measurements in an open pit quarry. *In: Isprs - International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, 2016, Prague, v. 41, p. 999-1004, jun. 2016.

RAHMAN, A A. Ab. *et al.* Volumetric calculation using low cost unmanned aerial vehicle (UAV) approach. **Iop Conference Series: Materials Science And Engineering**, [S.l.], v. 270, p. 012032, dez. 2017.

SANTOS, A. R. dos. **Apostila de Sensoriamento Remoto**. Alegre, 2013. 87 p.

SANTOS, S. de F. de O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. 2017. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SANTOS, S. de F. de O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, Curitiba, v. 22, n. 2, p. 309-321, mar. 2012.

SCHWUCHOW, U. H. **Cálculo de volume em mineração com levantamentos fotogramétrico (VANT) e geodésico (GNSS)**. 2018. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SEBOKA, Y. Charcoal production: opportunities and barriers for improving efficiency and

sustainability. **Bio-carbon Opportunities In Eastern & Southern Africa**. New York, p. 102-126, 2009.

SILVA, H. dos R. **Desempenho do rtk em rede sob efeito da cintilação ionosférica**. 2014. 130f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014.

SILVA, H. dos R.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Análise do desempenho do rtk em rede no brasil sob efeito da cintilação ionosférica. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.l.], v. 68, n. 10, p. 2083-2102, dez. 2016.

SOARES, P. *et al.* A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados no inventário florestal—o caso do montado de sobro. *In: Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia-CNCG*. 2015. p. 1-8.

SOININEN, T. *et al.* Data-Driven Approach to Satellite Selection in Multi-Constellation GNSS Receivers. *In: Conference: 8th International Conference On Localization And Gns (ICL-GNSS)*, Guimaraes, Portugal, p. 1-6, jun. 2018.

TOMMASELLI, A. M. G. *et al.* Fotogrametria: aplicações a curta distância. *In: FCT 40 anos, Perfil Científico-Educacional*. Presidente Prudente: Unesp/fct, 1999, p. 147-59.

VERGOUW, B. *et al.* Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments. *In: CUSTERS, Bart (ed.). The Future of Drone Use: opportunities and threats from ethical and legal perspectives. Opportunities and Threats from Ethical and Legal Perspectives*. [S.l.]: Tmc Asser Press, 2016. Cap. 2. p. 21-45.

ZHU, N. *et al.* GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, [S.l.], v. 19, n. 9, p. 2762-2778, set. 2018.